

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor: Výrobní systémy

Zaměření: Pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

## **NÁVRH A KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU PRO ZEFEKTIVNĚNÍ 3D OPTICKÉHO SKENOVÁNÍ**

### **DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE GAUGING FIXTURE FOR EFFECTIVE 3D OPTICAL SCANNING**

KVS - VS - 236

Bc. Jan Votrubec

Vedoucí práce: Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.

Konzultant práce: Ing. Petr Keller, Ph.D.

Počet stran: 65

Počet příloh: 16

Počet obrázků: 48

Počet tabulek: 10

Počet modelů

nebo jiných příloh: 1

V Liberci 24. 5. 2013

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	<b>Bc. Jan Votrubec</b>
studijní program	<b>M2301 Strojní inženýrství</b>
obor	<b>2301T030 Výrobní systémy</b>
zaměření	<b>pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

## **Návrh a konstrukce přípravku pro zefektivnění 3D optického skenování**

### **Zásady pro vypracování:**

(uved'te hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

Hlavním cílem této práce je konstrukční návrh a zhotovení prostorového měřicího přípravku pro zefektivnění bezkontaktního 3D optického skenování typizovaných součástí na otočný stůl GOM. Součástí práce bude kromě samotné realizace přípravku porovnání a vyhodnocení přínosů měřicího přípravku v procesu digitalizace 3D objektů.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s vybavením, které je na katedře dostupné (3D bezkontaktní skener Atos II 400, otočný stůl GOM, SW GOM Inspect apod.) a s principy optické digitalizace.
2. Provést rozbor možných variant a konstrukčních řešení měřících přípravků.
3. Provést návrh a konstrukci prostorového měřicího přípravku pro skener ATOS a otočný stůl GOM.
4. Porovnat měření bez použití a s použitím přípravku - porovnání přesnosti, časového a ekonomického hlediska.
5. Vyhodnocení výsledků, závěr.



Forma zpracování diplomové práce:

Rozsah průvodní zprávy cca 60 stran textu včetně příloh.

Diplomová práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložena na CD (či DVD) k tištěnému svazku diplomové práce.

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Navrátil, Robert. 3D skenery. *Reverse Engineering* [online]. 2000. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>
- [2] Augustin Frank a kolektiv. Strojírenská technologie 4 : Výrobní pomůcky. 1 978. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1978. 352 s. 04-224-78.
- [3] Dušák, Karel. Obráběcí přípravky. Říjen 2007. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. 185 s. ISBN 80-7183-284-7.
- [4] Hlaváč, V., Čonka, M.: Počítačové vidění, Praha Grada, 1992, 272 s. ISBN 80-85424-67-3.
- [5] Přednášky předmětu 3D digitalizace a rapid prototyping 1, 3D digitalizace a rapid prototyping 2.
- [6] Firemní podklady a uživatelské manuály k měřicímu systému ATOS a SW GOM Inspect, dostupné např. z [www.gom.com](http://www.gom.com).
- [7] Články na dané téma v odborných periodikách.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Keller, Ph.D.

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 1. března 2013

---

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).  
Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

**TÉMA: NÁVRH A KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU PRO ZEFEKTIVNĚNÍ 3D  
OPTICKÉHO SKENOVÁNÍ**

**ANOTACE:**

V první části diplomové práce je představena technologie optického skenování. Jsou zde dále uvedeny důvody návrhu přípravku, požadavky na něj kladené a popis vybraných přípravků, které jsou na trhu k dispozici.

Ve druhé části je proveden rozbor možných tvarů konstrukce, materiálu a upínacího mechanismu. Ze zmíněných aspektů byly zvoleny nejvhodnější varianty pro skener ATOS II a otočný stůl GOM. Vybrané varianty jsou detailněji rozvedeny a na základě získaných výsledků je přípravek vyroben. Konstrukce byla dále uzpůsobena pro efektivní využití na skeneru ATOS II. V závěru práce je porovnání měření s přípravkem a bez něho.

**THEME: DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE GAUGING FIXTURE  
FOR EFFECTIVE 3D OPTICAL SCANNING**

**ABSTRACT:**

In the first part of the diploma thesis optical scanning technology is presented. There are also the reasons of the design of the gauging fixture, the requirements placed on it and the description of selected fixtures which are available on the market.

The second part includes an analysis of possible shapes of the construction, materials and the clamping device. The most suitable variations for the optical scanner ATOS II and the turntable GOM were chosen from the mentioned aspects. The selected variations are elaborated in detail and on the basis of the obtained results the product has been manufactured. The construction has further been adapted for efficient use of the scanner ATOS II. The conclusion compares measurements with and without the help of the gauging fixture.

Desetinné třídění: 62

**Klíčová slova: ATOS, DIGITALIZACE, PŘÍPRAVEK, SKENER**

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno: 2013

Archivní označení zprávy:

Počet stran: 65

Počet příloh: 16

Počet obrázků: 48

Počet tabulek: 10

Počet modelů

nebo jiných příloh: 1

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 24. 5. 2013

Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval všem, bez nichž bych práci nemohl dokončit. Děkuji vedoucímu práce Ing. Radomíru Mendřickému Ph.D. za podnětné rady a trpělivost při vypracování diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří firmě SECO GROUP a.s., která mi umožnila spolupráci při výrobě.

Dále bych chtěl poděkovat firmě MCAE Systems za možnost využití systému TRITOP.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, sestře a partnerce za podporu a velkou trpělivost.

## Obsah:

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>9</b>
1.1 Cíle diplomové práce .....	9
<b>2 Seznámení s principem digitalizace.....</b>	<b>10</b>
2.1 Rozdělení 3D skenerů .....	10
2.2 Optický bezdotykový skener.....	11
2.2.1 Skener ATOS II .....	11
2.2.2 Úprava dílu před skenováním .....	13
2.3 Zpracování získaných dat.....	14
2.3.1 Software GOM Inspect .....	14
2.4 Napojování snímků pomocí referenčních bodů.....	14
2.4.1 Nekódované referenční body .....	16
2.4.2 Kódované referenční značky .....	16
2.5 Způsob skenování rozměrnějších součástí .....	17
2.5.1 Systém TRITOP .....	17
2.6 Otočná a naklápěcí jednotka.....	18
2.7 Přípravky .....	19
2.7.1 Důvody pro návrh přípravku .....	20
2.7.2 Upnutí dílu .....	21
2.8 Používané přípravky .....	21
2.8.1 Upnutí pomocí hrotu a pinoly .....	22
2.8.2 2D rámeček s podpěrami.....	22
2.8.3 Prostorový přípravek s upevněním ke stolu.....	23
2.8.4 3D rámeček s hroty .....	24
<b>3 Návrh přípravku .....</b>	<b>25</b>
3.1 Varianty přípravku .....	26
3.2 Analýza stínění návrhů konstrukcí.....	27
3.2.1 Znázornění výsledků .....	28
3.3 Materiál přípravku .....	33
3.3.1 Aluminiová konstrukce .....	33
3.3.2 Kovová konstrukce .....	35
3.4 Upínání hrotů.....	36

3.4.1	Upnutí pomocí šroubu.....	36
3.4.2	Upnutí pomocí excentru.....	37
3.4.3	Upnutí pomocí kontramatice.....	38
3.4.4	Upnutí pomocí svěrného spoje.....	38
3.4.5	Upínací prvky.....	40
3.5	Návrh excentru .....	40
3.5.1	Kontrola excentru na otláčení .....	43
3.6	Návrh hřídele.....	43
3.6.1	Redukované napětí.....	44
3.7	Upnutí excentrů .....	45
3.8	Ramena přípravku .....	46
3.8.1	Kontrola příčného profilu na otláčení .....	47
3.9	Výstupky pro referenční body .....	47
3.10	Návrh stojanu .....	48
3.10.1	Nasazení a utáhnutí - varianta č. 1 .....	48
3.10.2	Upevnění na čepy - varianta č. 2.....	49
3.10.3	Použití stojanu mimo otočný stůl GOM .....	50
3.11	Tuhost přípravku .....	50
3.12	Zkonstruovaný přípravek .....	52
3.13	Použité referenční body.....	54
<b>4</b>	<b>Rozbor měření objektu s přípravkem a bez přípravku.....</b>	<b>56</b>
4.1	Skenování bez přípravku .....	56
4.2	Skenování s přípravkem .....	57
4.3	Porovnání přesnosti .....	57
4.4	Porovnání času .....	60
4.5	Ekonomické zhodnocení .....	60
<b>5</b>	<b>Vyhodnocení výsledků, závěr.....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>65</b>



## Seznam použitých zkratk a symbolů

3D	... (Three Dimensions) prostorové znázornění
ALGOR	... Software využívající metodu konečných prvků
ATOS	... (Advanced Topometric Sensor) optický bezkontaktní skener
CAD	... (Computer Aided Design) počítačem podporovaný návrh
CCD	... (Charge Coupled Device) polovodič převádějící světlo na elektrický signál
CNC	... (Computer Numeric Control) číslicové řízení počítačem

$b$	[mm]	Charakteristická šířka
$d$	[mm]	Charakteristický průměr
$e$	[mm]	Excentrické vyosení
$E$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
$f_s$	[-]	Součinitel smykového tření
$f_{\tilde{c}}$	[-]	Součinitel čepového tření
$F$	[N]	Charakteristická síla
$F_u$	[N]	Upínací síla
$F_{ub}$	[N]	Bezpečná upínací síla
$F_t$	[N]	Třecí síla
$I_x$	[mm <sup>4</sup> ]	Polární moment k ose x
$k_b$	[-]	Koeficient bezpečnosti
$L$	[mm]	Charakteristický rozměr
$M_k$	[Nm]	Krouticí moment
$M_o$	[Nm]	Ohybový moment
$p$	[MPa]	Tlak
$p_d$	[MPa]	Dovolený tlak
$R$	[N]	Poloměr excentru
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha
$t$	[mm]	Vnitřní šířka profilu
$T$	[mm]	Vnější šířka profilu
$v$	[mm]	Vnitřní výška profilu
$V$	[mm]	Vnější výška profilu
$W_o$	[mm <sup>3</sup> ]	Průřezový modul v ohybu
$W_k$	[mm <sup>3</sup> ]	Průřezový modul v krutu
$y_{max}$	[mm]	Maximální průhyb
$\alpha$	[°]	Úhel natočení výstředníku
$\delta$	[°]	Úhel zdvihu výstředníku
$\sigma_{red}$	[MPa]	Redukované napětí
$\sigma_o$	[MPa]	Napětí v ohybu
$\tau_s$	[MPa]	Napětí ve smyku
$\tau_k$	[MPa]	Napětí v krutu

# 1 Úvod

V dnešní době se vše zrychluje, zpřesňuje a zjednodušuje. Stroje jsou automatizovanější a sofistikovanější. Bez pomocných zařízení, mezi která patří přípravky, by jejich činnost nebyla možná. Přípravky jsou užívány ve všech oborech strojírenského průmyslu. Využívají se při montáži, svařování, obrábění, tváření, měření a v dalších odvětvích. Právě pro měření jsou v určitých případech nepostradatelné. Zejména v oblasti optického skenování je nutné, aby měřený předmět byl nepohyblivě upevněn vůči referenci a zároveň bylo umožněno jeho polohování do různých pozic.

Při skenování není přípravek ve většině případů pouze nezbytností, ale může ušetřit čas k získání požadovaných dat. Ze známého rčení „*Čas jsou peníze*“ lze předpokládat větší zisk. V praxi se při skenování tyto přípravky navrhuje pro sériové měření konkrétního objektu.

Z toho důvodu by bylo vhodné navrhnout přípravek, jenž by umožňoval univerzálnější využití, přičemž by splňoval výše popsané parametry.

## 1.1 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a zkonstruovat jednoduchý prostorový přípravek, který urychlí práci se 3D skenerem ATOS II, konkrétně pro použití objektivu s měřicím objemem 250 x 200 x 200 mm. Přípravek by měl umožnit skenování objektu bez nutnosti lepení referenčních bodů na jeho povrch. Dále by měl poskytnout možnost upnutí k otočné a naklápěcí jednotce a zároveň mít schopnost změny jeho polohy se zachováním neměnné pozice objektu vůči přípravku.

Kromě návrhu a výroby přípravku bylo v závěru práce úkolem provést rozbor měření vybraného objektu bez použití a s použitím přípravku (tzn. porovnání přesnosti, časového a ekonomického hlediska).

## 2 Seznámení s principem digitalizace

### 2.1 Rozdělení 3D skenerů

V dnešní době existuje mnoho metod, kterými je možné získat digitální podobu fyzického modelu. V zásadě se používají dvě základní metody skenování. První metodou je dotyková a druhá bezdotyková.

Základní rozdělení skenerů:

- Dotykové
  - Mechanické
- Bezdotykové
  - Optické
  - Laserové
  - Destruktivní
  - Ultrazvukové
  - Rentgenové

[1], [2]

#### **Dotykové:**

Při skenování na tomto typu zařízení je nutné přejíždět kontaktní sondou po fyzickém objektu, čímž se získávají souřadnice bodů, ze kterých je možné vytvořit příslušné geometrie (např. kružnice, roviny, válce, koule). Získané informace odpovídají tvaru a členitosti povrchu snímané součásti. Pohyb koncového členu sondy může být řízen pomocí CNC systémů, nebo uživatelem (tedy ručně). Práce s dotykovými skenery je oproti bezkontaktním přesnější. Největší nevýhodou tohoto typu je, že zaznamenávání údajů trvá velice dlouho.

[1], [2]

#### **Bezdotykové:**

Bezdotykové senzory oskenují relativně velkou část modelu najednou a pomocí speciálních softwarů převedou data a poté vytvoří CAD model. Během měření by se měly zajistit ideální stálé podmínky okolí (např. osvětlení, prostor bez vibrací, atd.)

[1], [2]

V práci je podrobněji uvedena metoda bezkontaktního optického skenování, pro kterou bude přípravek navrhován a zkonstruován. Jedná se o velice rychlou metodu snímání objektů. Jedním ze zástupců pro tuto skupinu skenerů je i zařízení ATOS (Advanced Topometric Sensor), které je v laboratořích katedry Výrobních systémů k dispozici. Přípravek byl navrhován zejména pro využití při práci se skenerem ATOS II pro objektiv s měřícím objemem 250 x 200 x 200 mm. [1], [2]

## **2.2 Optický bezdotykový skener**

Optické bezkontaktní skenery se používají pro zdigitalizování velice tvarově složitých dílů, prototypů. Je možné jej použít i pro měření deformací součástí. Převážně se využívají v mnoha technických odvětvích, zejména v automobilovém průmyslu. Designéři nejprve navrhnu koncept nového automobilu z plastické hmoty v určitém měřítku a poté je model zdigitalizován pomocí optického bezdotykového skeneru. [3]

### **2.2.1 Skener ATOS II**

ATOS II je bezkontaktní optický skener vyráběný německou firmou GOM (Optical Measuring Techniques), který slouží k rychlému oskenování součástí. Skládá se ze dvou kamer a zdroje světla. Za osvětlovacím prvkem je speciální sada clon, která po prosvícení vytvoří na součásti tmavé a světlé proužky. Ty se zdeformují podle tvaru povrchu součásti. Zakřivené proužky jsou snímány pomocí dvou kamer s CCD čipem.

U tohoto typu skeneru se využívá metody triangulace, která vychází z předpokladu, že vzdálenost zdroje světla, senzorů a jejich úhlu natočení vůči sobě je předem známá a neměnná. Dále se využívá princip stereoefektu. Pokud jedna kamera nevidí na určitou část modelu nebo ji zářivka neosvítí, systém nedokáže zdigitalizovat zastíněnou oblast. Získané informace jsou zpracovány a poté dopočítány souřadnice každého bodu v prostoru pro každou kameru samostatně. Jeden snímek může obsahovat až miliony bodů, a proto se získaným datům říká mrak bodů (point cloud). Během skenování se musí dodržet vhodné podmínky osvětlení. V průběhu pořizování snímku se nesmí skenovaný objekt pohnout vůči svému okolí.

Snímané objekty mohou mít různé tvary, rozměry, a proto musí být naskenovány z různých stran. Pro správné navázání jednotlivých snímků na sebe je potřeba na díl nalepit tzv. referenční značky, pomocí kterých skener napojuje provedené snímky k sobě. Zmíněné orientační body jsou podrobněji popsány v kapitole 2.4 na straně 14.

[4], [5]



Obr. 1 Skenovací hlava ATOS II [4]

ATOS II (obrázek 1) umožňuje využít několik objektivů s různými měřicími prostory. Jejich volba závisí na velikosti dílu a úrovně potřebné přesnosti získaných informací. Menší objektivy se nasazují pomocí adaptéru, který dovoluje nastavit kamery blíže k sobě. Na katedře jsou k dispozici tři objektivy a každý z nich má definovaný měřicí objem uvedený v tabulce 1.

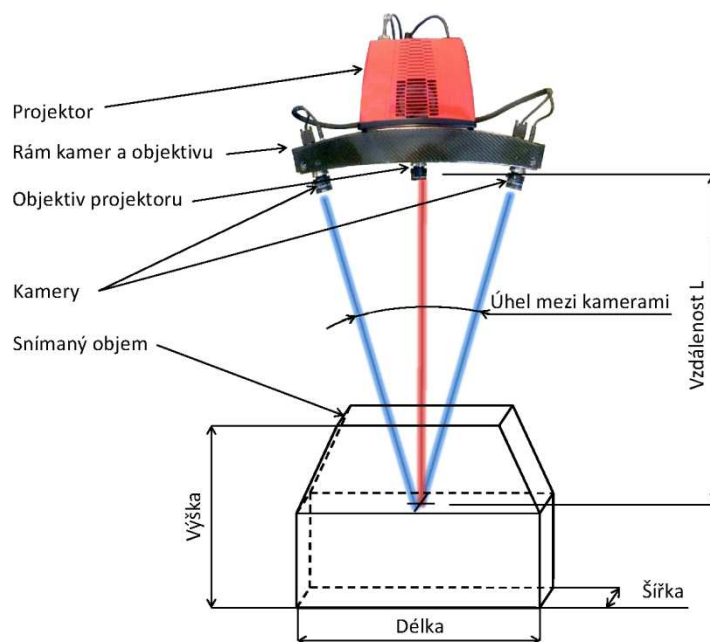
[6]

Tab. 1 Rozdělení objektivů na katedře KVS [6]

Objektiv	Měřicí objem [mm <sup>3</sup> ]			Vzdálenost L [mm]
	Délka	Šířka	Výška	
<b>700</b>	700	560	560	1030
<b>250</b>	250	200	200	730
<b>55</b>	55	44	30	300

Pro každý objektiv je definována rozteč ustavených kamer a vzdálenost skeneru od snímaného objektu, do které se musí zařízení před začátkem skenování ustavit. Na obrázku 2 je vidět skenovaný objem (délka, šířka, výška). Vzdálenost *L* je ustavení objektivu vůči středu objektu. Skenovací hlava se skládá z projektoru světla a rámu, ve kterém jsou upevněny dvě kamery a objektiv.

[3], [6]



Obr. 2 Vzdálenosti - ATOS II [3]

Před začátkem skenování se snímací hlava nastaví do optimální vzdálenosti vůči danému objektu. Ideální vzdálenost skeneru od objektu je 730 mm pro objektiv s měřeným objemem 250 x 200 x 200 mm, na který bude přípravek zkonstruován. Na obrázku 2 jsou modrými čarami znázorněné pohledy z kamer, mezi kterými je úhel  $31^\circ$ , a červenou čarou paprsek z projektoru. Střed objektu by se měl nacházet v místě, kde se protnou teoretické paprsky ze žárovky a kamer. Toto místo leží v pozici, kde dochází ke sjednocení dvou laserových stop. Pokud se model bude nacházet vně snímaného prostoru, nedojde k jeho oskenování. [6]

### 2.2.2 Úprava dílu před skenováním

Nevýhodou optického skenování je obtížné zachycení reflexního povrchu součástí. V takovýchto případech je nutné snížit jeho odrazivost. To se zajistí pomocí zmatňujícího křídového prášku. Pro kvalitnější přilnutí nástřiku k povrchu by mělo předcházet jeho očištění od nečistot a mastnot. Pokud by skenovaná součást byla tmavá (černá), systém by ji nedokázal zachytit, z toho důvodu se barva přípravků a pomocných prvků volí právě v této barvě. Přípravek se tak nenaskenuje. Získaná data ze skeneru se musí dále zpracovat a upravit pro další využití. [6], [3]

## **2.3 Zpracování získaných dat**

Získaná data ve formě mraku bodů je třeba dále upravit a převést do výstupního formátu, který dokážou další systémy otevřít. Pro zpracování údajů z optického skeneru ATOS se používá systém GOM Inspect Professional. Jako výstupní soubor se nejčastěji používá formát STL, který je definovaný trojúhelníkovou plochou mezi sousedními body a normálou. STL data mohou být dva typy ASCII a Binární. [7]

Upravená data jsou ve formě ploch složených z trojúhelníků. Pomocí programů je možné díly modifikovat na plná tělesa. Speciální program (např. Geomagic Studio) umožňuje zpracovat data do definovaných geometrických těles (např. válce, koule, zaoblení, atd.). S takto upraveným tělesem je možné v konstrukci pracovat, modifikovat nebo vkládat i do sestav. [8]

### **2.3.1 Software GOM Inspect**

Získaná data lze zkontrolovat, ověřit a analyzovat softwarem, který je volně k dispozici na webových stránkách firmy GOM. Je možné ho využít pro otevření dat ze softwaru GOM Inspect Professional, který umožňuje převedení získaného mraku bodů na 3D polygonální síť. Pokud by objekt nebyl dokonale zdigitalizován, je možné jej v tomto systému upravit, například lze doplnit nenaskenované části ploch, rádiusy, otvory, atd. V programu je možné porovnávat dva různé modely a zjišťovat rozměrové tolerance a úchyly geometrických prvků. Systém poskytuje nespočet dalších funkcí pro vylepšení a zpracování získaných dat. [9]

## **2.4 Napojování snímků pomocí referenčních bodů**

Fyzický model není možné oskenovat najednou ze všech stran, ale pouze po jednotlivých snímcích. Pro jejich přesné napojení na sebe se využívají doplňující speciální značky označované jako referenční body. Aby bylo možné snímky vzájemně propojit, je nutné znát minimálně tři společné body na každém dílčím snímku. Ty mohou být kódované (označeny číslem od 1 do 1000) a nekódované (označeny číslem vyšším).

Uvedené značky se lepí na měřený objekt před samotným skenováním. Pokud je objekt lesklý, je nutné na jeho povrch nanést antireflexní vrstvu. To se provede

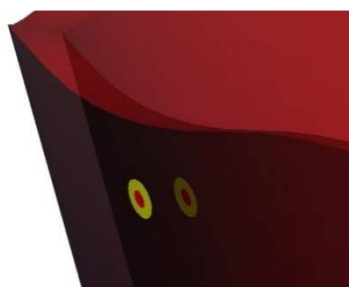
po nalepení zmiňovaných bodů. Po uskutečnění uvedené operace se musí značky opatrně očistit od nanesené zmatňující vrstvy. Přesnost digitalizovaného objektu je závislá na rozmístění referenčních bodů. Při jejich nevhodném rozmístění by mohla být snížena přesnost digitalizovaného objektu důsledkem nesprávného napojení jednotlivých snímků k sobě. V dalším rozdělení jsou základní požadavky na rozmisťování bodů, kterými můžeme snížit vzniklé nepřesnosti během skenování. [6]

### **Zásady rozmístění referenčních bodů:**

- Body by neměly ležet jen v jedné přímce.
- Referenční body by měly být umístěny na rovné nebo jen mírně zakřivené ploše.
- Referenční body musejí být dobře viditelné pro senzor ze všech skenovacích pozic.
- Referenční body musejí být vhodně rozloženy napříč celou délkou, šířkou a výškou měřicího objemu.
- Body by se neměly umisťovat blízko k hranám.
- Body by neměly ležet naproti sobě (u tenkostěnných objektů).
- Pro napojení dvou snímků je nutné, aby byly vidět minimálně tři společné body na obou snímcích.

[10]

Na obrázku 3 je znázorněná část výřezu misky (tenkostěnný objekt), která je zobrazena průhlednou červenou barvou. Referenční body jsou nalepeny na vnitřní a vnější straně obvodu objektu téměř naproti sobě. Skener v tomto okamžiku nedokáže přesně rozeznat body a může uvedené značky vzájemně zaměnit. Ve výsledku se digitalizovaný model může značně lišit i v tloušťce skenované misky. [6]



**Obr. 3 Referenční body proti sobě**



Pokud jsou souřadnice připevněných referenčních bodů na objektu již předem známy, je možné skenovat díly bez nutnosti napojování společných bodů. Systém díky známým bodům ví, kde se v daný okamžik nachází. K předem určení přesné pozice bodů se využívá systém TRITOP uvedený v kapitole 2.5 na straně 17. [6]

#### 2.4.1 Nekódované referenční body

Uvedené symboly jsou složené z černého kruhu s vepsaným bílým kruhem (barvy mohou být i opačné). Kontrast této značky umožní 3D skeneru nalézt přesnou polohu středu kružnic, která je zaznamenána do systému. Při každém novém snímku systém porovná právě naskenované body s již známými z předchozích skenů. V případě nalezení shody software napojí snímky na sebe. Doporučené rozměry referenčních bodů pro objektivy na katedře KVS jsou uvedeny v tabulce 2. Během skenování je ke každé značce přiřazeno číslo, které si systém pamatuje po celý cyklus skenování objektu. [6]

Tab. 2 Velikost referenčních značek [6]

Velikost objektivu	Doporučený průměr bílého kruhu[mm]
55	0,4
250	3
700	5

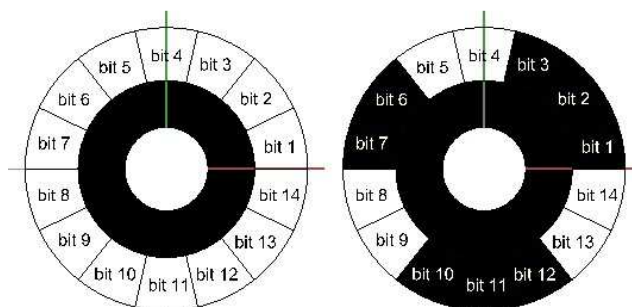
Referenční body nabízené firmou MCAE Systems je možné zakoupit:

- na samolepícím papíře,
- na magnetické fólii,
- z materiálu teplotně stabilního do 120°,
- z keramického materiálu.

#### 2.4.2 Kódované referenční značky

Mimo již zmíněných nekódovaných bodů existují i kódované referenční body, které jsou číslovány v závislosti na počtu použitých bitů. Využívají se především u systému TRITOP. Jedná se o značky, které mají definovanou velikost, a kde kolem

referenčního bodu je opsáno mezikružím. To je rozděleno na určité úseky, tzv. bity, určující pevné číslo daného bodu obrázek 4, kde je znázorněno 14-bitové kódování. [11]



**Obr. 4 Kódované body [11]**

Čím bude vyšší bitové kódování, tím hůře se budou body dekódovat. Značky se od sebe musí lišit tvarem opsaného mezikružím. Kódované symboly se označují od nuly do tisíce. [11]

## **2.5 Způsob skenování rozměrnějších součástí**

Někdy je potřeba oskenovat rozměrnější součásti, než dovoluje měřící objem daného objektu. K tomu se může využít pomocné zařízení označené TRITOP. Uvedeným systémem se zaznamenají souřadnice referenčních bodů nalepených na měřené součásti, které je možné importovat do skeneru ATOS II. Pokud souřadnice referenčních bodů připevněných na objektu nebudou známy, je vhodné vytvořit první snímek ve středu měřeného objektu a následně postupovat směrem k okrajům. Tím se redukuje chyba, která vzniká jednotlivým skládáním snímků. [6]

### **2.5.1 Systém TRITOP**

Jak již bylo zmiňováno výše, metoda je především využívána pro zaznamenání referenčních bodů připevněných na rozměrnějších objektech, jejichž rozměry jsou větší, než dokáže zachytit skener ATOS s definovanými měřícími objemy.

Jedná se o speciální přenosný optický systém zobrazený na obrázku 5. Ten slouží k měření přesných souřadnic referenčních značek, kontrastních čar, okrajů

vyznačených a připevněných na objektu. Skládá se z digitálního fotoaparátu, počítače, kalibračních tyčí a kódovaných bodů. Systém využívá principu fotogrammetrie. Nová verze zařízení ATOS Triple Scan obsahuje uvedený systém již zabudovaný ve snímací hlavě.

Referenční body připevněné na objektu se nasnímají z různých pozic v prostoru. Na základě získaných snímků systém vypočítá jejich přesné souřadnice. Získaná data mohou být vyexportována do potřebných formátů nebo použita přímo pro skener ATOS II. [12]



Obr. 5 Systém TRITOP [12]

## 2.6 Otočná a naklápěcí jednotka

Uvedený otočný stůl je zařízení (obrázek 6), které usnadní, zrychlí a zautomatizuje proces skenování. Na vrchní rotační desku se pevně připevní snímáný objekt. Pomocí softwaru GOM Inspect Professional je možné předem navolit velikost úhlu pootočení otočného stolu, naklopení a počet provedení automatických snímků, což velice usnadní práci na skeneru. Otočný stůl má upínací desku, která má průměr 300 mm se závitovými otvory o velikosti M6. Maximální nosnost otočné jednotky je 5 kg v její ose. Obsahuje dvě rotační osy, které umožňují otáčet deskou kolem vertikální a horizontální osy.

Natočení a posunutí je zajištěno krokovými motory ovládanými přes rozhraní USB. Otočení rotační desky je možné v rozmezí 360° kolem vertikální osy. Vodorovná osa umožní naklápění v rozsahu  $\pm 15^\circ$ .

Při upínání součásti je nutné brát v úvahu maximální nosnost stolu. Pokud se upnou díly mimo rotační osu, je pohyb především naklopení stolu omezen na nižší hodnoty než  $\pm 115^\circ$ . [6]



Obr. 6 Otočný stůl [4]

Výšku upínací desky je možné snadno nastavit pomocí pěti vymezovacích podložek, které mají předem stanovenou výšku od minimální hodnoty 10 mm až po maximální hodnotu 60 mm. [6]

## 2.7 Přípravky

Přípravky jsou pomocná zařízení, která zlepšují, usnadňují a zrychlují technologické procesy. Jejich největší výhodou je zkrácení času výroby nebo měření objektu. V důsledku toho se sníží náklady na vytvoření součásti nebo na zdigitalizování objektu. U skenerů by především měly urychlit skenování objektu, minimálně stínit v pohledu kamer a projektoru generujícího proužky světla. Dále by měly pevně upnout skenovaný objekt. Pomocí přípravku je možné oskenovat součásti, které by bylo jinak náročné nebo nemožné zdigitalizovat a jsou na něj kladeny následující základní podmínky:

- jednoduchá konstrukce,
- symetrická konstrukce,
- vysoká tuhost přípravku,
- možnost připevnění k otočnému stolu nebo na rovinný povrch,
- možnost rychlého a pevného upnutí součásti,
- nízká hmotnost konstrukce,
- minimální rozměry profilů přípravků,
- možnost upnutí univerzálních součástí.

Optický bezkontaktní 3D skener ATOS II s objektivem 250 snímá s přesností na setiny milimetru. Z toho důvodu je důležité, aby upnutá součást byla fixně upevněna vůči rámu přípravku, stolu nebo pomocnému zařízení, kde mohou být umístěny referenční značky. Pokud by se poloha upnutého objektu vůči referenčním bodům změnila, došlo by k nepřesnému spojení provedeného snímku s předchozími a získaný digitální model by byl nepřesný.

Bez použití uvedeného pomocného zařízení se referenční body, na které se zaměřuje optický skener, lepí na snímáný objekt, otočný stůl nebo pomocné prvky. [6]

### 2.7.1 Důvody pro návrh přípravku

Díky pomocným zařízením se zrychlí a usnadní proces zdigitalizování součástí. Jedná se zejména o odpadnutí:

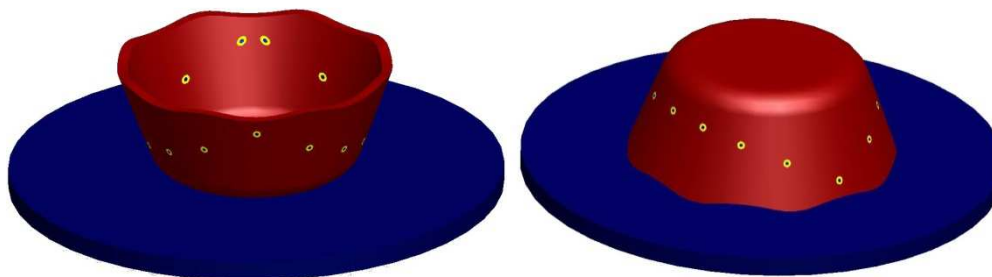
- lepení referenčních bodů na měřený objekt,
- spojování dvou sérií měření v prostorovém přípravku,
- náročného čištění referenčních bodů zastíněných antireflexní vrstvou.

Menší díly často nemají rovinnou plochu ani dostatečné místo, kam lze referenční body umístit. Připevněná značka má určitou plochu, která se nezdigitalizuje. Nezaznamenaná plocha může zkreslit výstup získaných dat.

Pokud již systém zná předem souřadnice referenčních bodů na přípravku, skenovaný díl se může snímat z libovolných pozic bez nutnosti napojování snímků na společné body z předešlých skenů. Jestliže jsou body nalepeny na součásti, vytvoří se první snímek. Následující snímek musí v sobě zahrnovat určitý počet referenčních bodů z předchozích skenování. Při použití přípravku se snižuje počet snímků, které je nutné provést pro kompletní vytvoření trojrozměrného modelu.

Na obrázku 7 na straně 21 je znázorněný příklad součásti, kterou je obtížné zdigitalizovat. Na uvedeném obrázku je vidět miska s rozmístěnými body. V okamžiku, kdy je potřeba získat kompletní digitální podobu snímaného objektu, může vzniknout problém s napojením jednotlivých snímků. Tyto obtíže by vznikly při pokusu o sloučení vnější a vnitřní geometrie misky, protože se na dílčích skenech nevyskytuje dostatečný počet společných bodů, pomocí kterých by systém spojil dílčí snímky. ATOS II dokáže zjistit polohu referenčních bodů pod úhlem 45°. Při větším úhlu se bod nezaznamená, nebo může dojít ke zkreslení výsledků. Pro oskenování uvedeného objektu by bylo

nutné doplnit okolí pomocnými prvky s referenčními body (např. stojany, svěráky, podložkami). [6]



Obr. 7 Referenční body nalepené na misce

### 2.7.2 Upnutí dílu

Pro ustavení dílů se mohou používat upínky a svěráky. V případě nutnosti lze použít i plastickou hmotu pro ustavení. Ta umožňuje uchycení objektu v libovolné pozici po dobu jeho skenování. Součást je možné zajistit i upínkami, ale ne vždy je možné jejich použití.

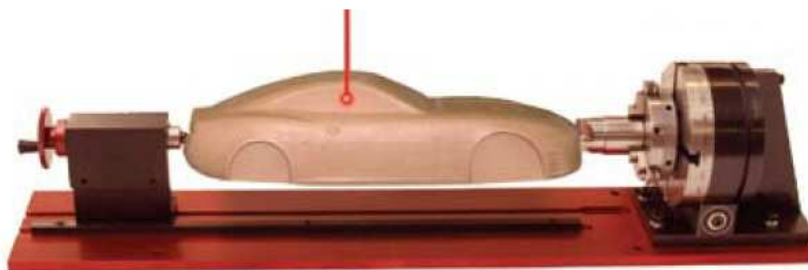
Skenovaný díl lze upevnit pomocí podpůrných prvků, hrotů, které minimálně cloní kamerám během snímání. Ostrá část zároveň umožní upnutí modelů s členitým povrchem. Pro upnutí dílů s rovinnou stranou by dostačovala opěrka s rovnou čelní plochou, která by dosedala k dílu. V místě upnutí by se plocha neoskenovala, ale pomocí softwaru by se nezdigitalizovaná část snadno ručně doplnila.

## 2.8 Používané přípravky

Univerzální přípravky pro 3D skenery se na trhu nevyskytují v širší nabídce provedení. Nejčastěji se používají tvarově jednoduché přípravky, především pro menší skenované součásti nebo jednoúčelové konstrukce pro konkrétní díly. Větší objekty jsou zafixovány do předem připravených pomocných prvků nebo speciálně navrhnutých přípravků pro daný typ součásti, většinou využívaných pro sériové měření. Dále jsou uvedeny vybrané přípravky, které jsou na trhu k dispozici.

### 2.8.1 Upnutí pomocí hrotu a pinoly

Uvedená metoda upnutí se používá především u soustružení dílů. Součást je pevně upnuta do hrotu ve sklíčidle a v pinole, které jsou znázorněné na obrázku 8. Se součástí je možné snadno otáčet kolem vodorovné osy a lze ji jednoduše a rychle oskenovat ze všech stran. Upínací systém je vhodný pro upnutí součásti především rotačního tvaru. [13]



Obr. 8 Upnutí do hrotů [13]

### Využití pro optický bezkontaktní skener ATOS

Pinola a rám sklíčidla jsou nepohyblivé prvky, na které není vhodné připevnit referenční body. Poloha modelu vůči stojanu se mění, a proto by se body musely nacházet na snímané součásti. Masivní sklíčidlo a pinola mohou stínit v pohledu z kamer. Plochy snímaného dílu nacházející se v blízkosti uvedených prvků, se budou obtížně digitalizovat.

### 2.8.2 2D rámeček s podpěrami

Jedná se o jednoduchou konstrukci složeného z pravidelného osmistranného profilu ve tvaru obdélníku (obrázek 9). Díl se upíná mezi válcové hroty, které procházejí přípravkem a jsou v něm připevněny pomocí šroubu („červík“). Přípravek je možné nasadit na otočnou a naklápěcí jednotku pomocí čtyř čepů přišroubovaných k desce. Uvedené podpěry mají osazené plochy, do kterých se rámeček nasadí.

Přípravek lze použít pro snímání součástí z vrchní i spodní strany. Zároveň i odpadá lepení referenčních bodů na díl, protože jsou nalepeny po obvodu přípravku. Upnutí modelu mezi přípravkem a součástí bude nedostačující u dílů, které mají

složitější tvar a vyšší hmotnost, například upnutí keramické misky (obrázek 7 na straně 21). Upínané součásti mají převážně tvar rovinného tělesa. Uvedená metoda je vhodná pro měření malých objektů. [14]



Obr. 9 Rámeček s krytkou [14]

### Využití pro optický bezkontaktní skener ATOS

Uvedený přípravek je speciálně navržen pro optický bezkontaktní skener ATOS. Je možné ho připevnit k otočné a naklápěcí jednotce. Přípravek je možné použít pro rozdílné objektivy (měřící objemy), jelikož na něm mohou být nalepeny referenční body různých velikostí. Použitím přípravku lze celý proces snímání zjednodušit a urychlit. Rámeček je konstruován speciálně pro optický bezkontaktní skener ATOS.

Součástí přípravku je i krytka (obrázek 9 - znázorněná červenou barvou), která se nasadí na přípravek během nanášení křídového postřiku. Nasazená krytka zabrání obarvení referenčních bodů na rámečku, které by se bez jejího použití musely před skenováním očistit od křídového postřiku. [6]

#### 2.8.3 Prostorový přípravek s upevněním ke stolu

Skenovaná součást je upnutá na stole, kolem které je pevně připevněný rám (obrázek 10) s referenčními body. Skener se orientuje pomocí uvedených značek. Konstrukce je složená z osmistěnných profilů přišroubovaných v jeden celek. Tímto způsobem lze snadno oskenovat objekty i složitého tvaru. Součást se nemůže otočit o 180° v přípravku a tudíž ji nelze oskenovat i ze spodní strany na jedno upnutí.





Obr. 10 Prostorový přípravek [15]

### Využití u optického bezkontaktního skeneru ATOS

Rámeček je navrhnutý speciálně pro uvedený skener. Umožňuje snadné a rychlé upnutí součásti a její následnou digitalizaci. Je vhodný pro součásti složitějšího tvaru, kdy není zapotřebí získat informace o dolní straně objektu. Rám přípravku se na stůl upevňuje až po nástřiku snímaného objektu, a tak odpadá proces čištění konstrukce.

#### 2.8.4 3D rámeček s hroty

Na obrázku 11 je vidět obdobná konstrukce jako u předešlého přípravku s rozdílem, že skenovaný objekt je upnutý mezi dva hroty.



Obr. 11 Prostorový přípravek s hroty [16]

### Využití u optického bezkontaktního skeneru ATOS

Součást je upnutá mezi hroty, které minimálně stíní, a tak lze snadno oskenovat díl ze všech stran. Optický skener se orientuje pomocí referenčních bodů připevněných na pomocné konstrukci. Upnutí součásti mezi dva hroty může být někdy nedostačující, jelikož záleží na tvaru, velikosti, materiálu a váze objektu.

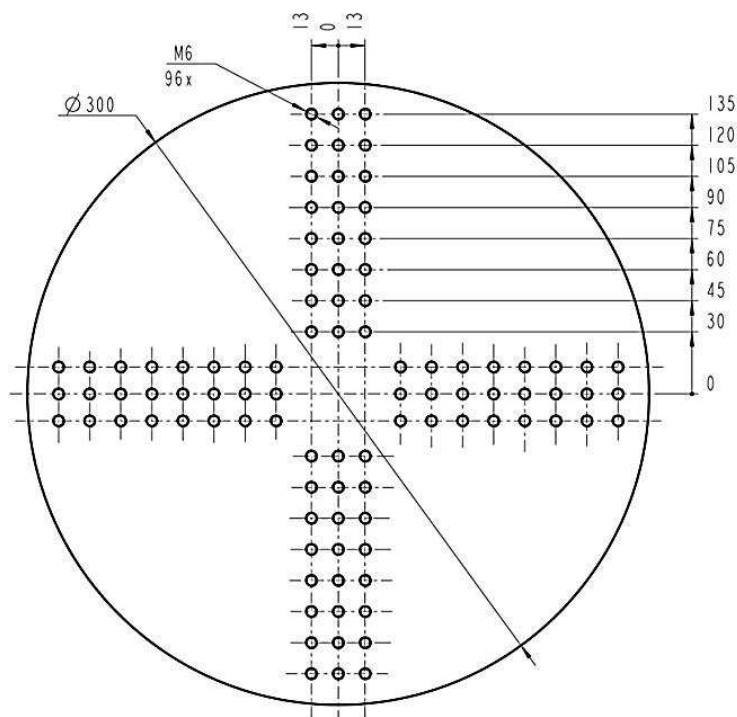
### 3 Návrh přípravku

V další části jsou popsány důvody volby vhodné konstrukce, materiálu a tvaru. Dále je zde uveden prototypový návrh a jeho vlastní vyrobení. Po jeho uskutečnění se na přípravek připevnilы referenční body, které se nasnímalы pomocí systému TRITOP. Získané informace o poloze bodů byly upraveny a zpracovány pro využití v softwaru GOM Inspect Professional, který ovládá skener ATOS II.

Volba finální podoby přípravku byla provedena na základě výsledků z provedených rozborů, kterými byly:

- analýza stínění přípravku na objekt,
- pevnostní výpočet s využitím metody konečných prvků,
- otestování viditelnosti bodů,
- návrh tvaru a konstrukce ramene,
- volba upínacího systému.

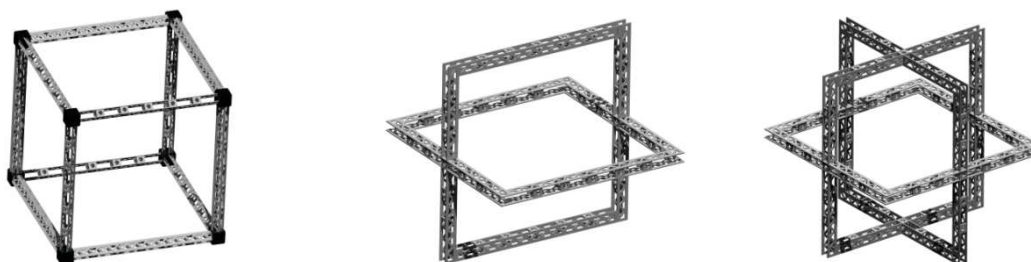
Přípravek byl navrhnout pro upevnění na otočnou a naklápěcí jednotku (kapitola 2.6 na straně 18), na které je připevněna rotační deska o průměru 300 mm se závitovými otvory M6 a danými roztečemi, které jsou znázorněny na obrázku 12.



Obr. 12 Upínací deska otočného a naklápěcího stolu

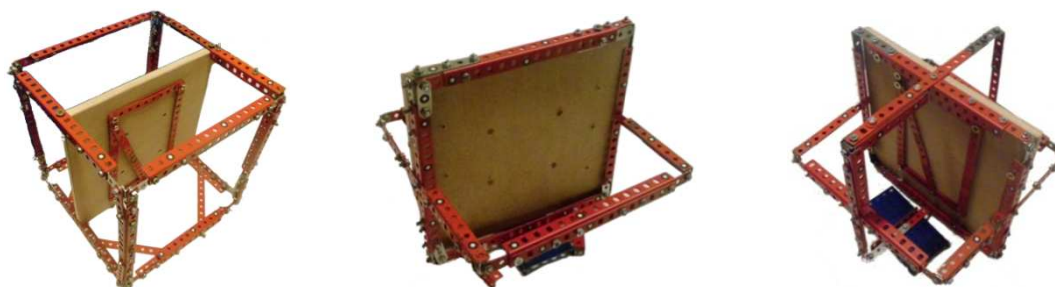
### 3.1 Varianty přípravku

Návrhy konstrukcí vycházely ze základních požadavků na upínací přípravek. To znamená, že se požadovala jednoduchá konstrukce, snadné a pevné upnutí objektu, vysoká tuhost přípravku a snadná uživatelská práce s přípravkem. Podle již dříve uvedených požadavků (kapitola 2.7 strana 19) byly vytvořeny tři návrhy (obrázek 13), ze kterých byl následně zvolen nejvhodnější přípravek. Vnější rozměr navrhovaných přípravků se volil 200 mm, z důvodu měřeného objemu, který je 250 x 200 x 200 mm.



Obr. 13 Koncepty - varianty 1, 2, 3

Uvedené koncepty byly fyzicky vytvořeny a sestaveny pomocí stavebnice MERKUR (obrázek 14). Návrhy byly otestovány přímo na skeneru ATOS II a byly zjištěny jejich vlastnosti při procesu skenování, především viditelnost nalepených bodů. Pomocná deska, která je vidět na obrázku, sloužila k ověření stínění přípravku během skenování (viz. kapitola 3.2 strana 27). Každý koncept, díky různému uzpůsobení ramen, umožňoval jiné rozložení referenčních bodů. Při měření pod určitým úhlem byly některé body zakryté a skener se orientoval menším počtem bodů.



Obr. 14 Sestavené návrhy MERKUR – varianty 1, 2, 3

Konstrukce byla snímána pod konkrétními úhly v prostoru. V určitých pozicích skeneru vůči přípravku, především pak u návrhu č. 1, systém viděl jen ty referenční

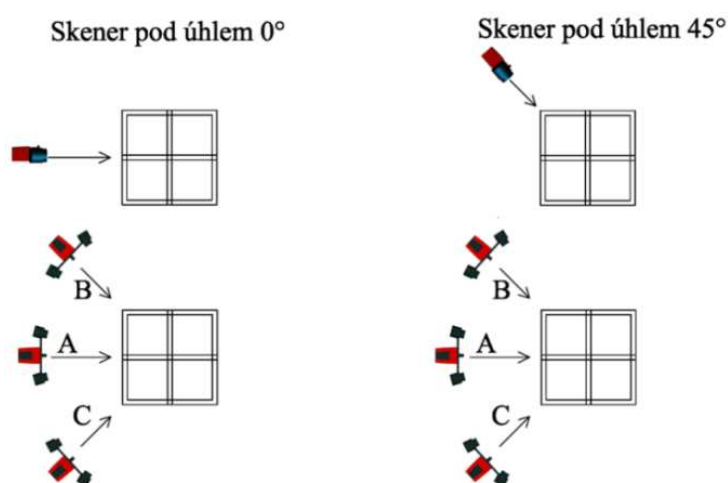
body, které byly blízko u sebe nebo ležely v jedné přímce. Při spojování jednotlivých skenů jen pomocí uvedených viditelných bodů, by se zvyšovala chyba transformace. Nalepené značky připevněné v hraničních místech přípravku se poměrně často vyskytovaly mimo měřený objem, kde je nebylo možné zaznamenat.

Návrhy byly dále podrobněji zpracovány v softwaru CREO-Elements do tvaru příhradové konstrukce složené z plechů. V uvedeném programu bylo možné zjistit orientační váhu jednotlivých konceptů. Při volbě přípravku se musel brát ohled na maximální nosnost otočného stolu (5 kg). Důležitou podmínkou při návrhu přípravku byla tedy jeho hmotnost. Ta měla být co nejnižší, z důvodu možnosti upnutí hmotnějších objektů.

### 3.2 Analýza stínění návrhů konstrukcí

Jedním z nejdůležitějších faktorů při rozhodování volby přípravku bylo jeho stínění (tzn. jak jednotlivé uzpůsobení ramen bude bránit v pohledu kamer na upnutý díl během skenování). Pomocí programu AutoCAD byla provedena analýza stínění navrhovaných tvarů přípravků na rovinnou desku (v odpovídajícím měřítku rozměrů a vzdáleností). Vycházelo se ze známých poloh kamer, zdroje světla a vzdálenosti snímané součásti od skenovací hlavy.

Nejdříve se analýzy provedly pro skener pod úhlem  $0^\circ$  znázorněné na obrázku 15 (A je kolmý pohled, B a C jsou natočeny o  $45^\circ$  kolem vertikální osy). Následně byl proveden stejný postup analýzy při nastavení skeneru pod úhlem  $45^\circ$  (podle vodorovné osy).



Obr. 15 Pohledy pro analýzu

### 3.2.1 Znázornění výsledků

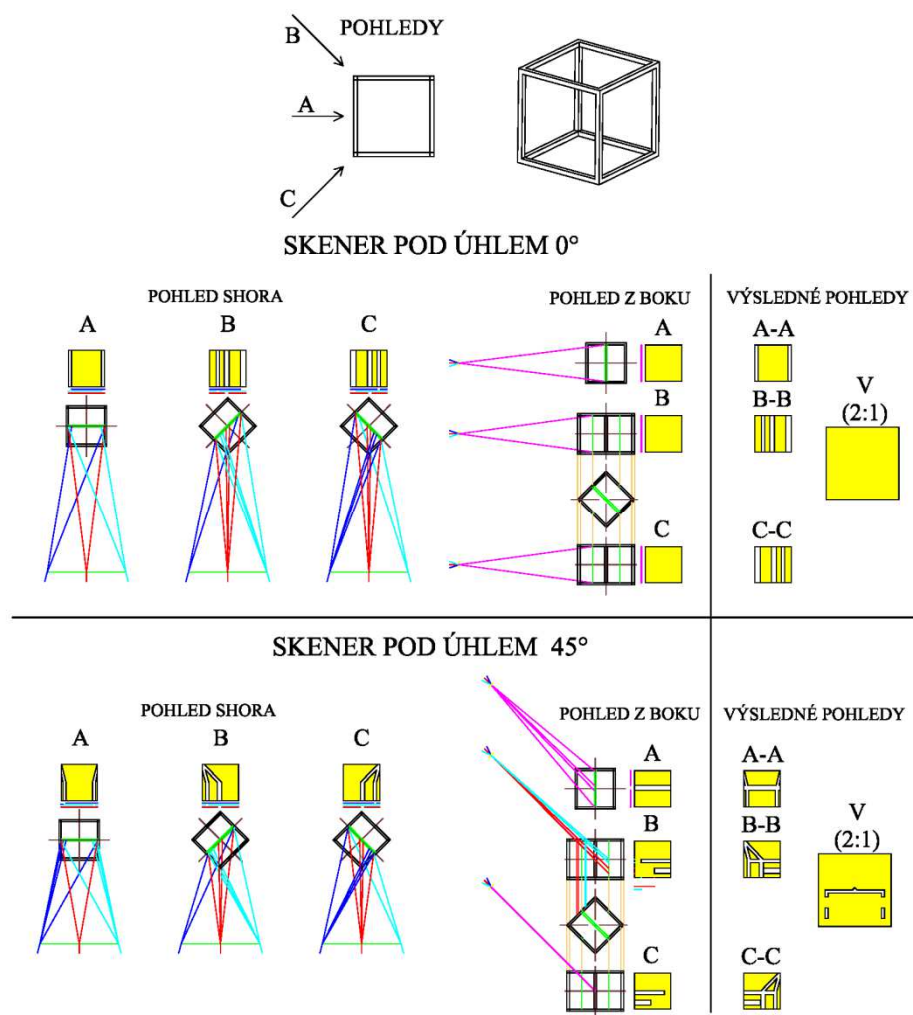
Na obrázcích 16, 18, 20 je červenou barvou znázorněný dopad světla od jeho zdroje. Tmavě a světle modrou barvou je označen paprsek vycházející z jednotlivých kamer skenovací hlavy ATOS II. Žlutá barva znázorňuje plochu, kterou je možno zdigitalizovat na jednom snímku. Analýza byla rozdělena do dvou pohledů. V horní části je provedena pro skener pod úhlem  $0^\circ$  a v dolní pod úhlem  $45^\circ$  vůči přípravku. Aby bylo možné provést rozbor, musely se jednotlivé snímky rozložit na dvě části a následně spojit dohromady. Výsledné obrazy označené **A-A**, **B-B** a **C-C** jsou logickými součiny pohledů shora a z boku. Ty znázorňují celkovou oskenovanou plochu u jednotlivých snímků. Výsledný logický součet provedených skenů je zvětšen v poměru 2:1 a je označen písmenem **V**. Zjištěné výsledky byly ověřeny pomocí reálných konstrukcí sestavených ze stavebnice MERKUR. Detailnější znázornění rozboru se nachází v přílohách I, II, III na formátu A3.

Vycházelo se z pravidla, že lze oskenovat plochu, která je vidět oběma kamerami a je zároveň osvětlena. Dle skutečných rozměrů se znázornila skenovací hlava ATOS II a pomocí čar se spojila hranice dopadajících paprsků od kamer a zdroje světla na rovinnou desku. Zastíněná místa se vynesla nad schématem každého přípravku pomocí přerušovaných úseček (pohled ze shora označení červená, světle a tmavě modrá barva). Ve vynesení čtverci je znázorněna žlutá plocha, kam dopadnou paprsky od kamer a osvětlení současně. Stejným způsobem se provedl rozbor pro pohled z boku. Zde pohled z kamer a osvětlení splývá, v obrázku je označen fialovou barvou. Pro skener pod úhlem  $45^\circ$  se musela navíc provést analýza pomocí řezů přípravku. Díky vytvořeným modelům v softwaru CREO-Elements bylo možné lépe pochopit a sestavit analýzy stínění navrhovaných přípravků.

#### Varianta č. 1

Výsledné údaje z rozboru pro variantu č. 1 jsou uvedeny na obrázku 16. Konstrukce nestíní v poloze skeneru pod úhlem  $0^\circ$  vůči přípravku, protože jednotlivá ramena nebrání kamerám při zaznamenání upnuté součásti (pohled označený písmenem **V**). Pokud bude provedeno skenování pod úhlem  $45^\circ$ , ramena přípravku budou minimálně stínit. Navrhnutý koncept je vhodné použít pro skenování objektu, kdy skener je pod úhlem  $0^\circ$ . Po provedení snímku (**A-A**) se zaznamená poměrně velká část

plochy. Při skenování pod jiným úhlem dochází k většímu zastínění ploch (pohledy označené **B-B**, **C-C**).



Obr. 16 Analýza stínění AutoCAD – varianta č. 1

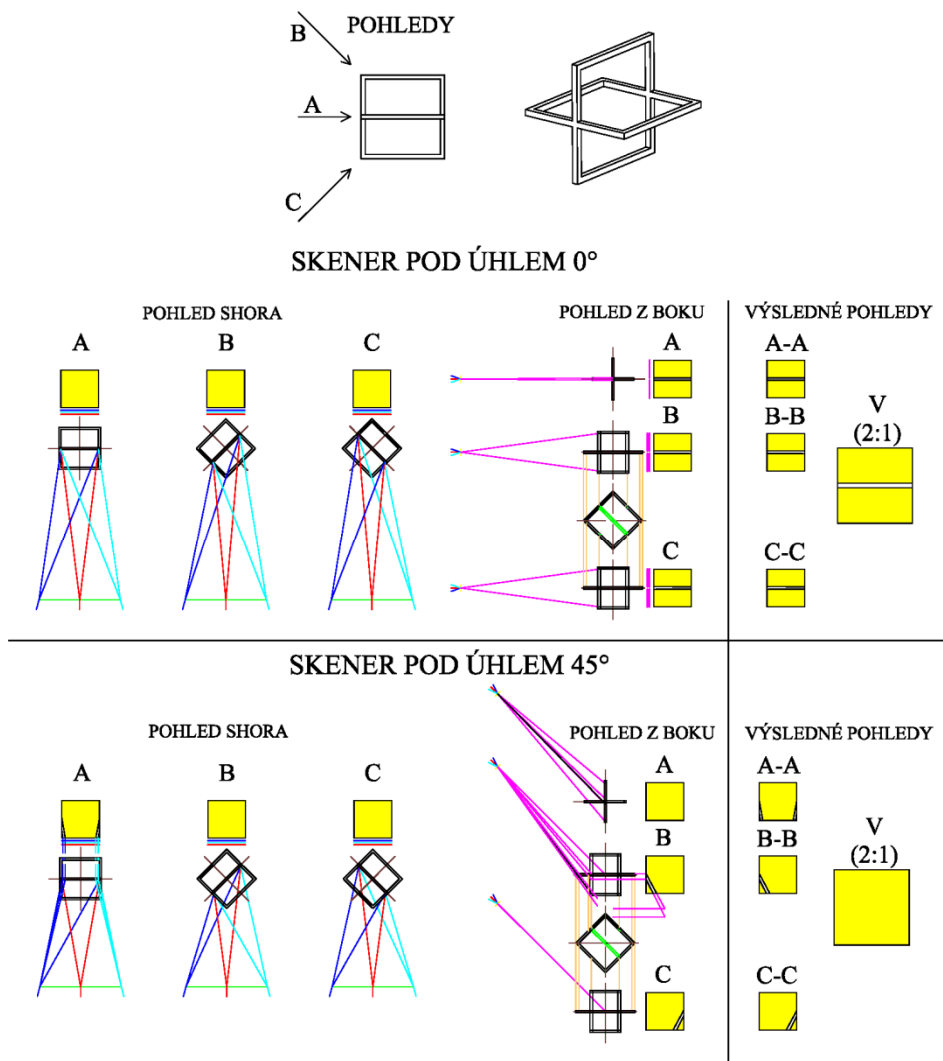
Analýza provedená za účelem zjištění stínění přípravku byla ověřena pomocí optického skeneru ATOS II. Na obrázku 17 je vlevo znázorněna deska, která je upnutá v konstrukci sestavené ze stavebnice MERKUR. Vpravo je vidět šedou barvou plocha, kterou bylo možné zaznamenat po provedení tří snímků, kdy byl skener pod úhlem 45°. Zaznamenaný tvar odpovídá analýze získané ze softwaru AutoCAD označené písmenem **V** (skener pod úhlem 45°).



Obr. 17 Analýza stínění ATOS II – varianta č. 1

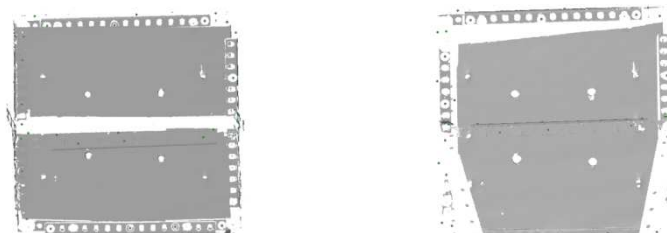
## Varianta č. 2

Na obrázku 18 je zobrazen zjištěný výsledek v pozici skeneru 0° (pohled V), kde rameno přípravku vždy stíní na díl v určitém místě. Naopak objekt je možno dobře zaznamenat pod skenovacím úhlem 45°. Upnutý objekt lze dobře oskenovat z libovolné pozice, kde uzpůsobení ramen minimálně brání v pohledu kamer (znázorněné na dílčích pohledech A-A, B-B, C-C).



Obr. 18 Analýza stínění AutoCAD – varianta č. 2

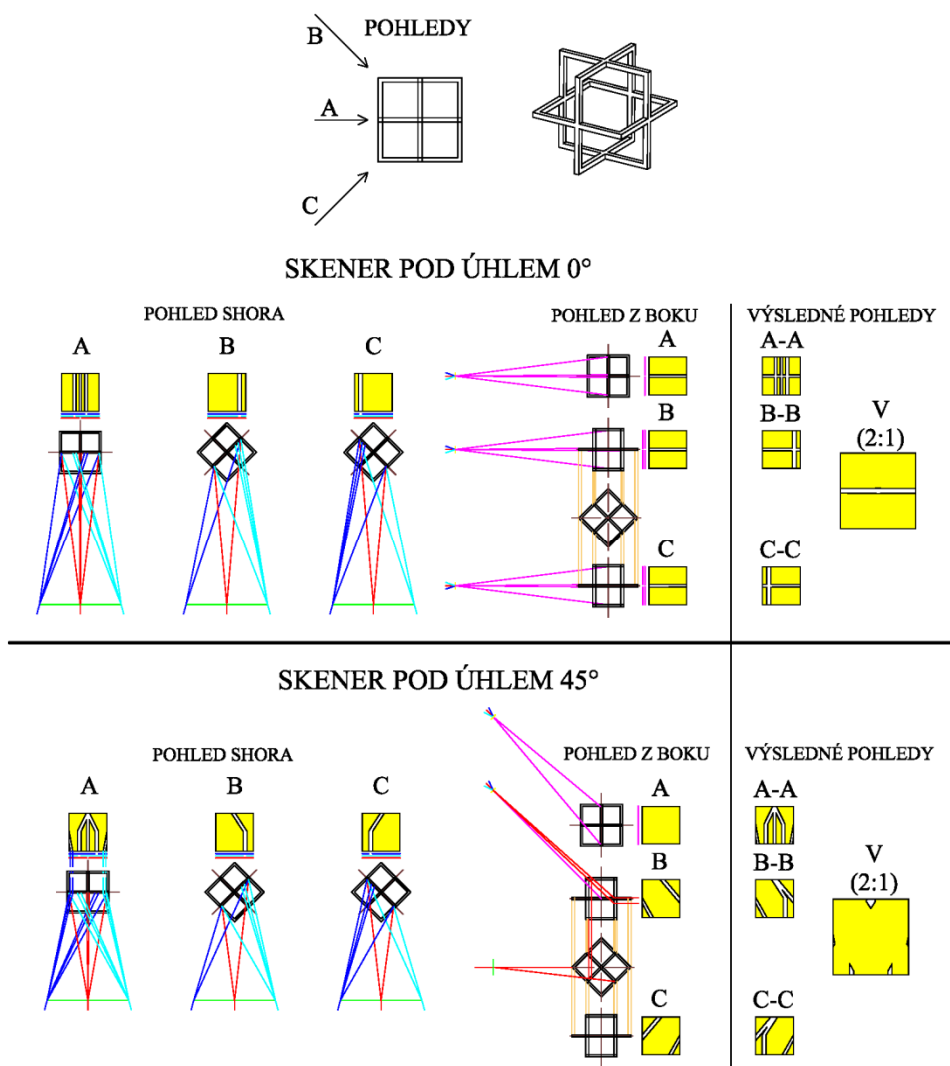
Zjištěné výsledky na obrázku 19 korespondují s provedenou analýzou uvedenou výše. Obrázek vlevo odpovídá výslednému logickému součtu, který je označený písmenem V (skener pod úhlem 0°). Obrázek vpravo odpovídá pohledu A-A (skener pod úhlem 45°).



Obr. 19 Analýza stínění ATOS II – varianta č. 2

### Varianta č. 3

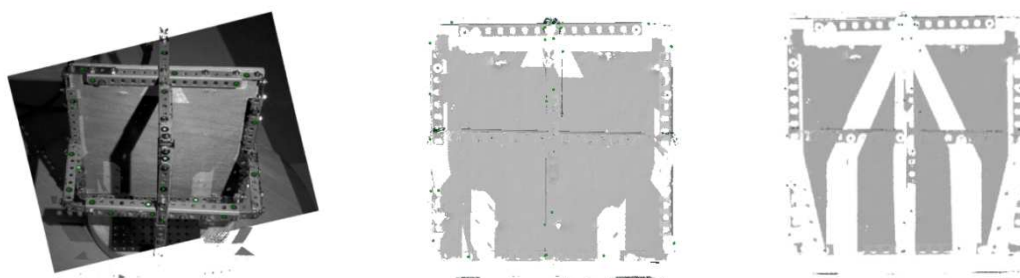
Provedená analýza je vidět na obrázku 20. U přípravku s velkým počtem ramen je u logických součinů **A-A**, **B-B**, **C-C** poměrně větší nezaznamenaná plocha, ale na pohledu **V** je vidět téměř stejný celkový výsledek jako u varianty č. 2. Pod úhlem 45° se nepodařilo zcela zaznamenat kompletní plochu a zůstala zde malá neoskenovaná místa.



Obr. 20 Analýza stínění AutoCAD – varianta č. 3



Optickým skenerem ATOS II byly ověřeny výsledky z analýzy provedené pomocí softwaru AutoCAD. Na obrázku 21 vlevo je vidět sestavená konstrukce z MERKURU navrhované varianty č. 3. V jejím středu byla upnuta deska, na které se ověřovalo stínění přípravku. Prostřední obrázek znázorňuje výsledný pohled označený písmenem **V**, kdy skener byl sklopen pod úhlem 45°. Obrázek vpravo koresponduje s pohledem označeným **A-A** (opět pod úhlem 45°). Teoretická analýza odpovídá údajům zjištěných v praxi.



Obr. 21 Analýza stínění ATOS II – varianta č. 3

### Zhodnocení návrhů

Po provedení tří snímků a jejich spojení (z kolmého pohledu a dvou pod úhlem 45° kolem vertikální osy) se oskenovala kompletní plocha jen u varianty č. 1 (skener v poloze 0°) a č. 2 (skener v poloze 45°). U návrhu č. 3 je na první pohled vidět, že je složen z velkého počtu ramen, které brání v pohledu kamer a osvětlení.

Analýzy byly provedeny ve zjednodušeném tvaru pro rovinnou desku. V praxi se budou digitalizovat objekty komplikovaných tvarů, které bude nutné oskenovat na více provedených snímků, než bylo znázorněné v rozboru.

Tab. 3 Srovnávací tabulka - tvar přípravku

	<b>Varianta č. 1</b>	<b>Varianta č. 2</b>	<b>Varianta č. 3</b>
<b>Stínění přípravku</b>	Střední	Nejmenší	Nejhorší
<b>Velikost vložené součásti [mm<sup>2</sup>]</b>	~ 180 x 180	~ 180 x 115	~ 115 x 85
<b>Viditelnost bodů</b>	Nejhorší	Střední	Nejlepší
<b>Tuhost</b>	Nejhorší	Střední	Nejlepší

V tabulce 3 je porovnání vlastností jednotlivých navržených variant vůči sobě. Jejich hodnocení bylo rozděleno do tří stupňů slovně od nejlepšího po nejhorší (kromě velikosti upínaného objektu).

Pomocí softwaru CREO-Elements byly určeny maximální velikosti vkládaných objektů do přípravků. U návrhu č. 3 bránilo ve vložení objektů uzpůsobení ramen konstrukce. Největší součásti bylo možné upnout u návrhu č. 1. (rozměry jsou uvedeny v tabulce 3).

Na sestavené varianty ze stavebnice MERKUR byly umístěny referenční body ze všech stran profilu, ve středu ramen a v každém rohu konstrukce. Při skenování z libovolných úhlů bylo zjišťováno, zdali je možné body vždy zaznamenat nebo jestli se dostávají mimo měřicí objem. U varianty č. 3 bylo možné vhodně rozmístit body po konstrukci do odlišných rovin a přímek. Skener se dobře orientoval v prostoru přípravku. Naopak nejhůře se digitalizoval přípravek v navrhované variantě č. 1. Body na uvedeném návrhu se nacházely v pravidelných přímkách. Z toho důvodu by mohlo dojít k větší transformační chybě při spojování snímků. Při skenování přípravku pod úhlem 45° u varianty č. 1 se referenční body často vyskytovaly mimo snímatelnou oblast 250 x 200 x 200 mm.

Nejdůležitějším parametrem bylo stínění přípravku, které bylo nejmenší u varianty č. 2. Zároveň na uvedeném návrhu bylo možné vhodně rozmístit referenční body, které se nedostávaly mimo měřicí objem. Na základě zjištěných a uvedených vlastností byla zvolena varianta č. 2.

### **3.3 Materiál přípravku**

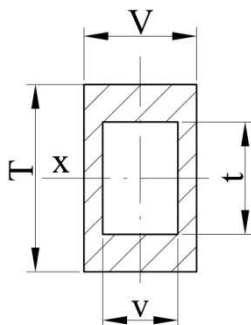
Zásadní vliv na vlastnosti přípravku měla volba materiálu, jeho pevnosti, hmotnosti a ceny. Z důvodu ceny a dostupnosti se rozhodovalo mezi aluminiovou a ocelovou konstrukcí.

#### **3.3.1 Aluminiová konstrukce**

Aluminiová konstrukce je lehká, snadno vyrobitelná, levná, ale méně tuhá. Pokud by profil byl z uvedeného materiálu, váha přípravku by se pohybovala v rozmezí 0,2 – 0,5 kg (ověřeno pomocí programu CREO-Elements).

Dalším rozhodujícím kritériem pro volbu materiálu byl požadavek na tuhost přípravku, která byla počítána pro zatížení 3 kg. Pro vypočítání průhybu konstrukce je

nutné znát polární moment průřezu ramene přípravku, který je zobrazen na obrázku 22 s označenými rozměry.



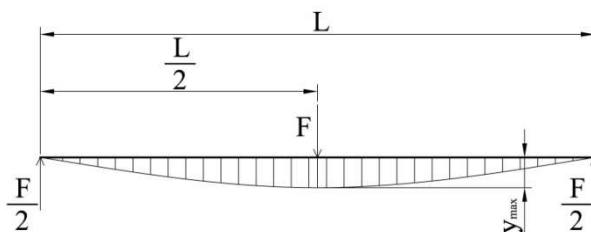
Obr. 22 Průřez profilu [17]

Výpočtovým vztahem (1) byl zjištěn polární moment ramene přípravku, kde jednotlivé rozměry jsou vyznačeny na obrázku 22, který znázorňuje plný a dutý profil.

$$I_x = \frac{V \cdot T^3 - v \cdot t^3}{12} \quad (1) [17]$$

Přípravek se skládá ze stejných ramen, která jsou symetrická, a proto byl proveden výpočet jen pro jedno rameno. V místě jejich spojení je tuhost přípravku největší, a proto byl výpočet proveden pro nejkritičtější místo.

Obrázek 23 znázorňuje prohnutí nosníku při zatížení v jeho středu, kde modul pružnosti v tahu hliníku  $E$  je  $71 \times 10^3$  MPa, délka nosníku  $L$  je 190 mm,  $F$  značí zatěžující sílu (30 N) a  $y_{max}$  maximální průhyb, který je zjištěn pomocí rovnice (2). Síly označené  $F/2$  jsou výsledné reakce v podpěrách.



Obr. 23 Zatížený nosník [17]

$$y_{max} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \quad (2) [17]$$

Nevýhodou u hliníkové konstrukce jsou poměrné poddajné profily, do kterých bude nutné upnout hroty držící snímaný model. Zjištěné hodnoty průhybu jsou uvedeny v tabulce 4. Pokud by se hroty upínaly pomocí šroubu v hliníkové konstrukci, mohlo by dojít snadno k poničení závitu.

### 3.3.2 Kovová konstrukce

Kovová konstrukce je velice tuhá a těžká. Pro výpočet průhybu se použily stejné vzorce uvedené výše (1), (2) jako u hliníku, kde modul pružnosti v tahu pro ocel  $E$  je  $2,1 \times 10^5$  MPa. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4 (hmotnost ověřena pomocí programu CREO-Elements).

Tab. 4 Velikost průhybu a hmotnost přípravu podle materiálu

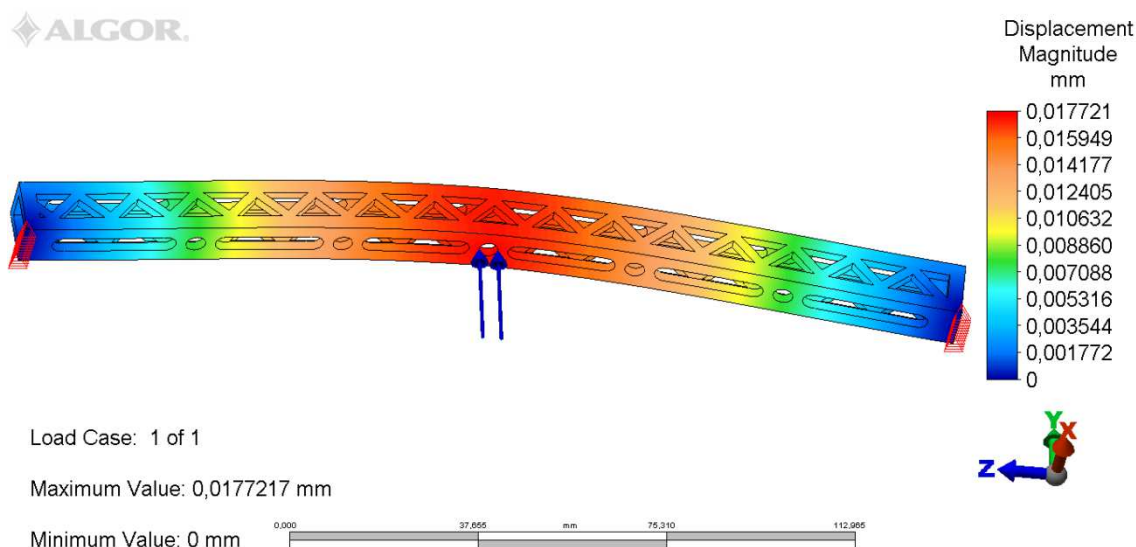
Typ konstrukce	Délka $L$ [mm]	Síla $F$ [N]	Vnější rozměr [mm <sup>2</sup> ]	Vnitřní rozměr [mm <sup>2</sup> ]	Váha [kg]	Průhyb [mm]
Plný hliník	190	30	10 x 10	---	0,41	0,072
Dutý hliník				6 x 6	0,26	0,083
Plná ocel				---	1,3	0,024
Dutá ocel				6 x 6	0,74	0,028

Nejmenší průhyb ramene přípravku by byl dosažen z materiálu z plné ocele, která by měla předpokládanou hmotnost 1,3 kg. Pro upevnění konstrukce je nutné vyrobit stojan, který by zvyšoval jeho celkovou hmotnost. Upínaný objekt byl zvolen o maximální hmotnosti 3 kg. Z toho důvodu není možné uvedený koncept zvolit, protože nejvyšší nosnost otočného stolu je 5 kg a tato hodnota by mohla být překročena.

Na základě zjištěných hodnot se zvolila konstrukce složená z ocelových plechů, které jsou dostatečně tuhé, a váha samotného přípravku by se pohybovala kolem 0,75 kg. Z tabulky 4 je vidět, že hliníková konstrukce je velice lehká, ale její průhyb by byl třikrát větší než u oceli, a tak by nebyla zajištěna dostatečná pevnost přípravku.

Rameno bylo otestováno pomocí metody konečných prvků softwarem ALGOR, kde se uvažovalo i s jeho odlehčením. Zvolil se materiál 11 523, u kterého byl vypočítán maximální průhyb 0,0177 mm (viz obrázek 24). Rozměry odpovídají hodnotám v tabulce 4. Protože se v rameni nacházejí otvory pro upínané hroty, bylo

nutné zatížení rozložit na dvě síly. Každá síla má velikost 15 N (modré šipky) a působí na okraji připraveného otvoru pro hroty, v tomto případě s nejkritičtějším zatížením ramene (tzn. v jeho středu).



Obr. 24 Mapa prohnutí ramene pomocí programu ALGOR

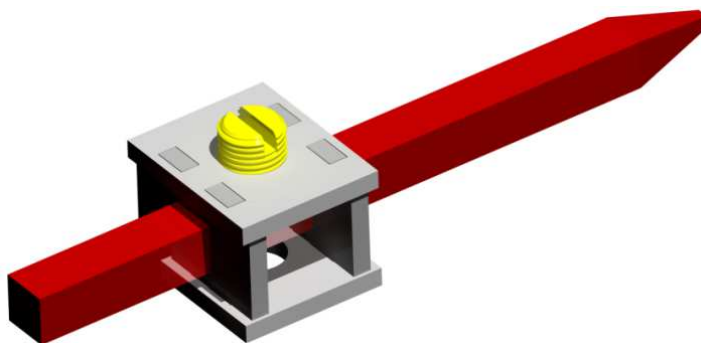
### 3.4 Upínání hrotů

Skenovaný objekt se bude nacházet uvnitř konstrukce a je nutné ho pevně upevnit k přípravku, na kterém jsou nalepeny referenční body pro skener ATOS II. Díl se nejlépe zajistí pomocí ostrých hrotů, které budou minimálně stínit. Jednotlivé hroty musí být pevně, stabilně a rychle upnuty v přípravku. Proto byl proveden rozbor možných variant upnutí a z nich zvolena nejvhodnější.

#### 3.4.1 Upnutí pomocí šroubu

Jedná se o velice jednoduchý mechanismus znázorněný na obrázku 25, kde se k upevnění hrotu jen pootočí šroub tzv. „červík“, a tím dojde k přitlačení hrotu k protilehlé stěně a k jeho zafixování.

Mezi nevýhody patří nedostatečné zajištění proti uvolnění šroubu a malá funkční délka závitu, která by byla vyříznuta v tenkém plechu. K zabránění uvolnění šroubu by mohla být využita matice (kontramatice), ale uvedený způsob upínání hrotů by byl zdlouhavý.

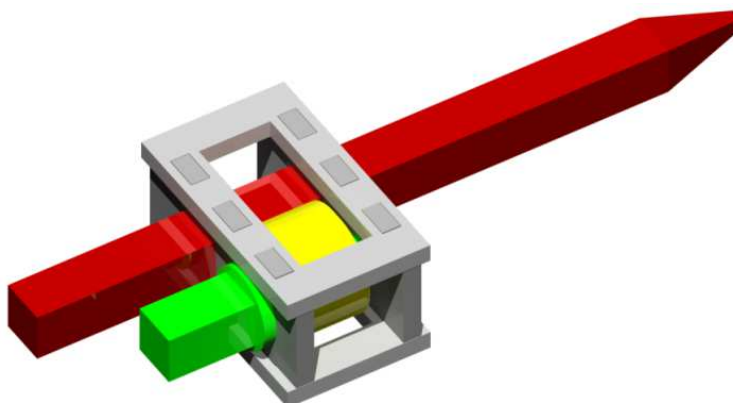


Obr. 25 Upínání pomocí šroubu

### 3.4.2 Upnutí pomocí excentru

Mechanismus je založen na principu upínání pomocí výstředníku nasazeném na hřídeli (viz obrázek 26). Je to velice rychlá metoda upnutí při vynaložení minimální síly a malého úhlu pootočení, kde v příčném plechu (označeno šedou barvou) je vytvořen pomocný otvor pro hřídel excentru (zelená barva). Konec hřídele by byl upraven pro daný utahovací klíč. Excentr (znázorněný žlutě) při otočení upne pevně hrot (červená barva). Mezi velké výhody patří samosvornost mechanismu, které bude docíleno při překročení určitého úhlu pootočení. Systém lze snadno nadimenzovat k potřebným upínacím hodnotám (působícím silám). Nevýhodou je nutnost přidání prvků, které budou zvyšovat cenu přípravku. Při upínání je vhodné použít momentový klíč, kde se nastaví maximální upínací moment.

V případě poničení upínacího systému lze snadno vyměnit výstředník za jiný.



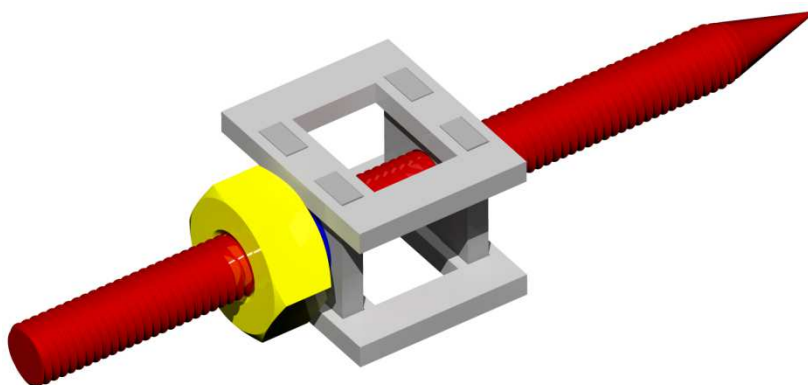
Obr. 26 Upínání pomocí excentru

### 3.4.3 Upnutí pomocí kontramatice

Upínání objektu uvnitř konstrukce je provedeno pomocí válcového hrotu, na kterém je po celé délce vyříznutý závit. Hrot se zašroubuje k upínanému objektu a utáhne se pomocí matice, která zajistí jeho polohu proti uvolnění (tzv. kontramatice). Nevýhodou je nutnost vyříznutí závitu na pomocné prvky, které by procházely závitovými otvory v rameni přípravku. Jak je vidět na obrázku 27, jedná se o jednoduchý systém upínání.

Mezi nevýhody použití uvedeného mechanismu patří:

- delší čas potřebný pro zašroubování hrotu a matice,
- krátký závit v otvorech přípravku,
- cenově nevýhodná výroba hrotů,
- riziko posunutí hrotu o vůli v otvorech při otáčení přípravku s objektem.

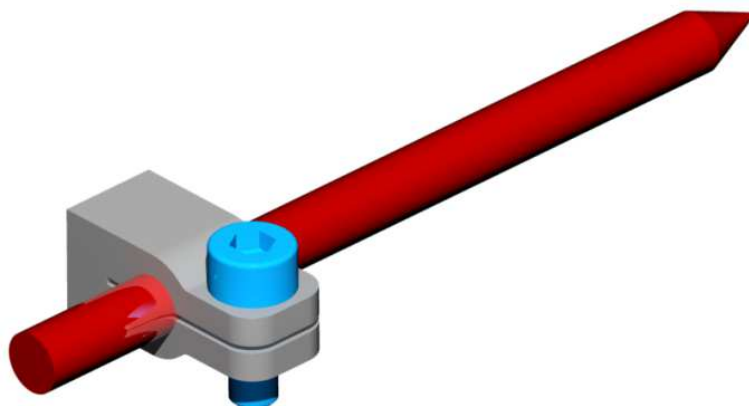


Obr. 27 Upínání pomocí kontramatice

### 3.4.4 Upnutí pomocí svěrného spoje

Na obrázku 28 je znázorněný svěrný spoj s jednostranně rozříznutým nábojem. Umožňuje rychlé a pevné upevnění hrotů v dané poloze. Sevření se zajišťuje pomocí šroubu, kterým se přitlačí pružné prvky k sobě a vyvodí se svěrná síla. Pro správnou funkčnost systému je nutná určitá délka dotykové plochy u hrotů. Mechanismus je velice vhodný pro upínání, ale vzniká zde problém se zaimplementováním systému do ramene přípravku. Mezi další nevýhody patří poměrně masivní bloky, kterých bude v přípravku použito více a budou značně zvyšovat hmotnost konstrukce. Pokud by se

nedopatřením porušil svěrný blok nebo poničil závit, nebylo by možné mechanismus vyměnit.



Obr. 28 Svěrný spoj

### Zhodnocení mechanismů

V níže uvedené tabulce 5 je vidět zhodnocení jednotlivých upínacích mechanismů. Jednotlivé vlastnosti systémů byly porovnávány vůči sobě (slovně).

Tab. 5 Porovnání upínacího mechanismu

Systém	Náklady	Implementace do přípravku	Rychlost upnutí	Kvalita upevnění	Možnost výměny
<b>Šroub</b>	Malé	Dobrá	Výborná	Dobrá	Částečná
<b>Výstředník</b>	Vyšší	Snadná	Výborná	Výborná	Ano
<b>Kontramatice</b>	Malé	Snadná	Horší	Horší	Částečná
<b>Svěrný spoj</b>	Střední	Dobrá	Výborná	Výborná	Ne

Nejvhodnějším systémem by bylo použití šroubu, který by se dotahoval ke hrotu, a tím ho zajistil. Tento mechanismus se nevolil z důvodu, že by se jednalo o krátkou funkční délku závitu a nutnost zajištění šroubu maticí proti uvolnění.

Méně vhodným by byl svěrný spoj, který je rychlý, snadný a přesný. Jeho velikou nevýhodou je, že není možné mechanismus vyměnit, pokud by se systém poničil.



Na základě uvedených hodnot byl zvolen výstředníkový mechanismus, který bude sice dražší, ale v případě poničení je možné vyměnit všechny součásti. Umožňuje snadné, pevné a rychlé upnutí hrotu v požadované poloze.

### 3.4.5 Upínací prvky

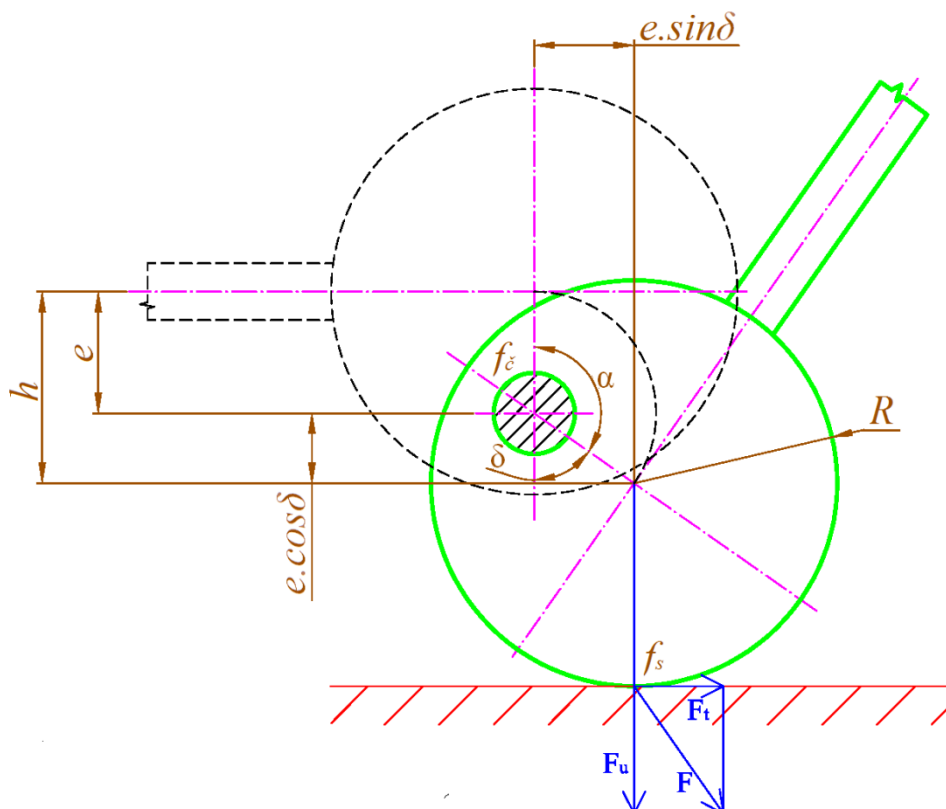
Upínací prvky jsou z materiálu 11 600 tažené za studena. Polotovary pro uvedené hroty byly dodány v tyčích o délce 1 m a čtvercového průřezu 4 mm. Hroty byly vyrobeny v určitých délkách uvedených v tabulce 6.

Tab. 6 Délky a počet vyrobených hrotů

Délka [mm]	Počet [ks]
45	10
60	7
70	7
80	6
100	6
120	3
140	3
150	1

### 3.5 Návrh excentru

Na obrázku 29 je znázorněno schéma výstředníkového upínacího mechanismu. Čárkovanou čarou je označen excentr v uvolněné poloze a plnou zelenou čarou v pozici upnutí. Síly jsou zobrazeny modrou barvou a rozměry hnědou. Hlavním parametrem je excentrické vyosení  $e$  a poloměr excentru  $R$ , které udávají velikost zdvihu a samosvornost mechanismu. [18], [19]



Obr. 29 Schéma výstředníku [18]

V tabulce 7 jsou uvedeny parametry navrhnutého excentru a působící síly.

Tab. 7 Rozměry navrhnutého excentru a působící síly

Název rozměru	Označení	Jednotka	Velikost
Bezpečná upínací síla	$F_{ub}$	[N]	300,00
Koeficient bezpečnosti	$k_b$	[-]	1,50
Poloměr výstředníku	$R$	[mm]	5,50
Součinitel čepového tření	$f_c$	[-]	0,10
Součinitel smykového tření	$f_s$	[-]	0,15
Třecí síla	$F_t$	[N]	30,00
Upínací síla	$F_u$	[N]	200,00
Úhel natočení páky	$\alpha$	[°]	115,00
Úhel zdvihu	$\delta$	[°]	65,00
Výstřednost	$e$	[mm]	1,10
Zdvih skutečný	$h$	[mm]	1,56
Zdvih maximální	$h_{max}$	[mm]	2,20

Hrot v přípravku musí zůstat upnutý po utažení excentru. Tuto podmínku vyjadřuje vztah (3), který znázorňuje podmínku samosvornosti výstředníku vycházející z momentové rovnováhy. Hodnoty  $r_1$  a  $r_2$  jsou poloměry hřídele v místech uložení ( $r_1 = 2 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 2,65 \text{ mm}$ ).

$$F_t \cdot (R - e \cdot \cos \alpha) + \frac{F_u}{2} \cdot f_{\check{c}} \cdot r_1 + \frac{F_u}{2} \cdot f_{\check{c}} \cdot r_2 \geq F_u \cdot e \cdot \sin \alpha \quad (3) [19]$$

Z důvodu největší nosnosti otočného stolu 5 kg se uvažovalo s upínáním objektu o maximální hmotnosti 3 kg, který na hrotech vyvodí sílu o velikosti 30 N. Uvedená síla se bude rovnat třecí síle  $F_t$ . Ve vztahu (4) je uveden výpočet upínací síly  $F_u$ . Síla  $F_{ub}$  představuje upínací sílu zvětšenou o bezpečnostní koeficient.

$$F_u = \frac{F_t}{f_s} \quad (4)$$

Po dosazení rovnice (4) do (3) se třecí síla  $F_t$  vyruší a výsledný vztah je upraven do vztahu ve tvaru (5).

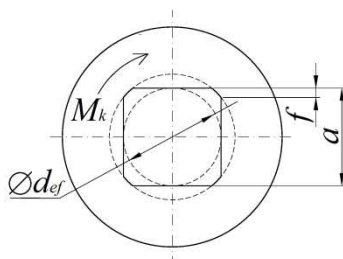
$$\cos \alpha_{1,2} \geq \frac{f_s}{e} \left[ f_s \cdot R + \frac{f_{\check{c}} \cdot (r_1 + r_2)}{2} \right] \pm \sqrt{1 - \frac{1}{e^2} \left[ f_s \cdot R + \frac{f_{\check{c}} \cdot (r_1 + r_2)}{2} \right]^2} \quad (5) [19]$$

Po dosazení hodnot do vztahu (5) vychází, že  $\alpha_1 = 65,2^\circ$  a  $\alpha_2 = 97,5^\circ$ . Pro samosvornost se uvažuje s úhlem větším než je  $97,5^\circ$ , při otočení páky o větší uhel bude vždy zajištěna podmínka samosvornosti. Rozměry výstředníku a jeho vzdálenost od upínaného objektu byly navrženy tak, aby se excentr otočil vždy minimálně o úhel  $\alpha = 115^\circ$ , a tím bude vždy zajištěna samosvornost.

Materiál excentru byl zvolen z oceli 12 050 z důvodu větší pevnosti, odolnosti proti korozi a možnosti vypálení na laseru. Ve výstředníku byl zároveň na laseru vypálen čtvercový otvor o velikosti 4,6 mm. Otvor slouží k zabránění protáčení excentru nasazenému na hřídeli.

### 3.5.1 Kontrola excentru na otláčení

Spojení hřídele s výstředníkem je polygonové (čtvercové viz obrázek 30), kde kontrola na otláčení je vypočítána podle vztahu (6), kde krouticí moment  $M_k$  je 637,25 Nmm (kapitola 3.7 strana 45). Hodnoty  $a$  a  $f$  jsou znázorněny na obrázku 30 ( $a = 4,6$  mm,  $f = 0,98$  mm),  $b$  je šířka spoje, která je 4 mm. Parametr  $n_b$  je počet boků profilu (4 boky) a  $k_{ef}$  součinitel efektivního počtu nesoucích boků o velikosti 0,75.



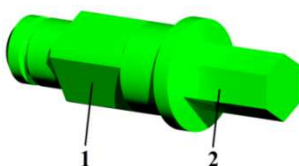
Obr. 30 Polygonové spojení [20]

$$p_{max} = \frac{M_k}{\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot (a - f) \right]^2 \cdot k_{ef} \cdot n_b \cdot b} \leq p_D \quad (6)[20]$$

Maximální tlak vyšel 48,63 MPa, kde maximální dovolená hodnota tlaku na otláčení je 80 MPa. Materiál hřídele byl zvolen z kvalitnějšího materiálu než excentr, a dovolený tlak na otláčení v uvedeném prvku bude vždy vyhovovat.

### 3.6 Návrh hřídele

Nejvíce namáhanou součástí je hřídel (obrázek 31), na kterou působí namáhání krutem, stříhem a ohybem. Z jednotlivých dílčích napětí se muselo zjistit redukované napětí. Zároveň se i provedla kontrola na krut v místě, které má tvar pravidelného šestihranu s opsanou kružnicí o velikosti 4 mm. Hřídel je zvolena z materiálu 14 220 z důvodu vysoké pevnosti, kde mez kluzu  $\sigma_k$  je 590 MPa a dovolené napětí v krutu je 177 MPa. V místě 1 působí ohybové, smykové napětí a namáhání krutem zároveň. V místě 2 je součást zatížena pouze kroutícím momentem od upínacího nástroje.



Obr. 31 Navrhnutá hřídel

Zakončení hřídele je normalizovaný profil (pravidelný šestihran o velikosti 4 mm). Na opačné straně je zajištěna třmenovým kroužkem DIN 477 zajišťující hřídel v axiální poloze.

### 3.6.1 Redukované napětí

Při upínání je hřídel namáhána krouticím momentem, ohybem a smykem. Z důvodu krátké délky součásti bude mít na výsledné napětí vliv i smykové napětí. Pro zkontrolování součásti je nutné zjistit redukované napětí. Nejdříve byly vypočítány dílčí napětí, ze kterých je pomocí HMM hypotézy vztahem (7) zjištěno výsledné napětí v součásti. Pro zjednodušenou kontrolu se uvažuje s nejmenším průměrem 4 mm, kde koeficient bezpečnosti  $k_b$  je roven 2 a mez kluzu  $\sigma_k$  je 590 MPa.

Výsledné redukované napětí je 128,09 MPa a je menší než dovolené napětí, které je 295 MPa. Materiál hřídele vyhovuje a byl zvolen z kvalitnějšího materiálu, protože není k dispozici momentový klíč, kterým by bylo možné upínat přesně stanoveným krouticím momentem.

$$\sigma_{red} = \sqrt{[\sigma_O^2 + 3(\tau_k^2 + \tau_s^2)]} \leq \sigma_D = \frac{\sigma_k}{k_b} \quad (7) [20]$$

#### Napětí v ohybu

Pomocí rovnice (8) bylo vypočítáno ohybové napětí působící na součást. Kde síla  $F_{ub}$  je 300 N a délka  $L$  je vzdálenost podpěr, které jsou od sebe 7 mm. Výsledné ohybové napětí je 83,56 MPa.

$$\sigma_O = \frac{M_O}{W_O} = \frac{\frac{F_{ub} \cdot L}{4}}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} \quad (8)$$

#### Napětí ve střihu

Vztah (9) představuje výpočet střihového napětí, kde  $F_{ub}$  je bezpečná upínací síla a  $S$  průřez hřídele. Výsledné smykové napětí je rovno 23,87 MPa.

$$\tau_s = \frac{F_{ub}}{S} = \frac{4 \cdot F_{ub}}{\pi \cdot d^2} \quad (9)$$

## Napětí v krutu

Uvedená rovnice (10) představuje výpočet namáhání v krutu. Kde krouticí moment je 637,25 Nmm (kapitola 3.7). Výsledné krouticí napětí vyšlo 50,71 MPa pro kruhovou část o průměru 4 mm.

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_k} \quad (10)$$

Pro kruhový průřez je průřezový modul roven vztahu (11)

$$W_K = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (11)$$

Kontrola na krut byla provedena pro výstupní část hřídele. Průřezový modul v krutu pro pravidelný šestiúhelník je uveden ve vztahu (12). Hodnota  $p$  představuje vzdálenost rovnoběžných stran uvedeného profilu a její velikost je 3,46 mm. Zjištěné krouticí napětí v uvedeném místě je 81,40 MPa a je menší než dovolené napětí, které je 177 MPa.

$$W_k = 0,189 \cdot p^3 \quad (12) [17]$$

## 3.7 Upnutí excentru

Ve vzorci (13) je uveden výpočet velikosti utahovacího momentu a působící síly kde  $f_{\xi}$  je součinitel čepového tření o velikost 0,1. Hodnoty  $r_1$  a  $r_2$  jsou poloměry hřídele v místech uložení ( $r_1 = 2$  mm,  $r_2 = 2,65$  mm). Potřebný moment pro upnutí je 637,25 Nmm při otočení excentru o  $115^\circ$  vůči stanovené poloze.

$$M_k = F_{ub} \cdot \left[ e \cdot \sin \alpha + f_s \cdot (R - e \cdot \cos \alpha) + \frac{f_{\xi} \cdot r_1}{2} + \frac{f_{\xi} \cdot r_2}{2} \right] \quad (13) [19]$$

Pokud by byl použit stranový klíč, vznikaly by velké síly, které by mohly deformovat ramena přípravku. Pro minimalizaci působení sil na přípravek během upínání je zvolen utahovací klíč ve tvaru **T**. Ten nebude vyvolávat síly na rameno přípravku, ale bude působit jen krouticím momentem v ose hřídele, která má zakončení v pravidelném šestihranu.

Na obrázku 32 je vidět upravený T klíč, kde délka samotného dřívku byla 100 mm. Ten byl zkrácen a svařen pro snadnější užívání nástroje. Pro zakrytí svaru byla využita termoplastická trubička, která je nasazená na dřívku.



Obr. 32 Utahovací klíč

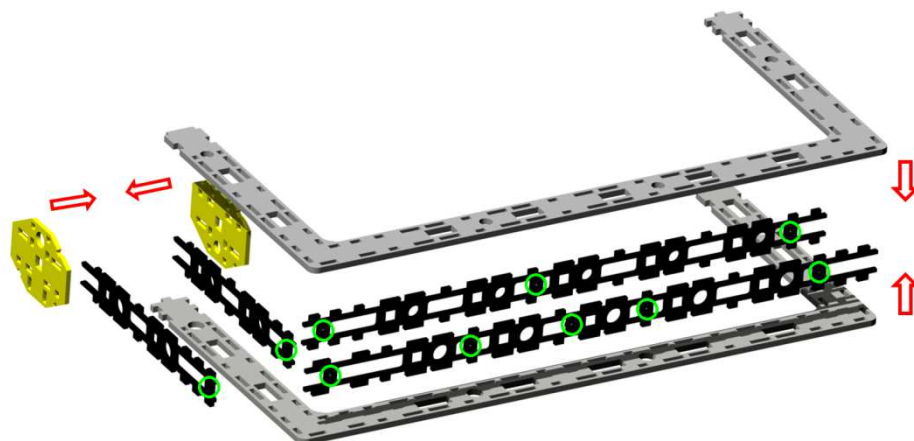
Pro získání lepších vlastností a delší životnosti přípravku, by bylo vhodné použít momentový klíč, kterým by se zabránilo překročení krouticího momentu.

### 3.8 Ramena přípravku

Přípravek je složen z jednotlivých ramen, která se skládají z plechů vypálených pomocí laseru a jsou z materiálu 11 523. Na obrázku 33 jsou šedou barvou znázorněné podélné plechy o tloušťce 2 mm a černou barvou příčné plechy o tloušťce 1,5 mm. V prvcích jsou vytvořeny zámky, které do sebe vzájemně zapadají. Délka výstupků je menší o 0,2 mm (na stěnu) oproti otvorům, do kterých se vloží. Žlutou barvou je znázorněný vyztužující prvek, který drží jednotlivá ramena. Červené šipky znázorňují složení ramene z plechů.

Příčné plechy mají vypálené čtvercové otvory pro upínací hroty a v určité vzdálenosti od nich jsou kruhové otvory pro nasazení hřídelí. Konstrukce příčných prvků je odlehčená z důvodu získání menší váhy konstrukce. Podélné plechy mají vypálené obdélníkové otvory pro nasazení excentrů.

Již v prvotním návrhu se uvažovalo s referenčními body, které se budou muset na konstrukci nalepit, nabarvit, nebo pomocí dalšího prvku připevnit (znázorněná místa zelenou kružnicí), a které budou trvale na přípravku. Ramena konstrukce byla navrhována tak, aby se referenční bod dal umístit do vymezených ploch, byl jich dostatečný počet a upínací mechanismus nestínil všem bodům. Aby nedocházelo při skenování k problémům, musí se každý profil od ostatních lišit. V případě výskytu dvou stejných profilů v konstrukci, by mohlo dojít ke špatnému rozpoznání bodů a zkeslení výsledků.



Obr. 33 Rozložené rameno přípravku

### 3.8.1 Kontrola příčného profilu na otláčení

Dále byla provedena kontrola na otláčení ve spojení hřídele s rámem přípravku, protože síla působící na hřídel bude zároveň působit i na profil, ve kterém bude uložena. Plocha na otláčení je rovna průmětu dotykové plochy hřídele s rámem. Hřídel je otláčována na dvou místech, a proto je provedena kontrola pro kritičtější případ (menší dotyková plocha:  $d = 4$  mm) při působení poloviční síly. Šířka plechu  $b$  je 1,5 mm. Kontrola příčného plechu je uvedena ve vztahu (14).

$$p = \frac{F_{ub}}{2 \cdot S} = \frac{F_{ub}}{2 \cdot d \cdot b} \leq p_{dov} \quad (14)$$

Vypočítaný tlak je 25 MPa a je menší než dovolený tlak, který je 80 MPa, a proto velikost otvoru v plechu vyhovuje.

### 3.9 Výstupky pro referenční body

Příčný plech je zapuštěný o 1,2 mm z důvodu větší tuhosti přípravku. Pokud by referenční bod byl nabarvený přímo na uvedeném plechu, mohlo by docházet při skenování k zaclonění značky podélným prvkem. Pro dobré zaznamenání referenčních bodů skenerem, by byly připevněny na pomocné prvky (výstupky), které by se do konstrukce vložily, a tím by byla zajištěna dobrá viditelnost bodu. Jedná se o válcové plochy s vnějším průměrem 7,2 mm a malým osazením.



### 3.10 Návrh stojanu

Přípravek není možné upevnit samostatně k otočnému stolu, a proto byl navrhnut stojan, který zajistí jeho připevnění. Stůl má přesně dané rozteče otvorů pro šrouby o velikosti M6 a muselo se s nimi uvažovat při konstrukci. Přípravek se nesmí během upnutí ve stojanu deformovat. Na držáku nebudou referenční značky, na které by se zaměřoval skener ATOS II. Z toho důvodu na něj nejsou kladeny velké nároky na tuhost jako na skenovací přípravek. Důležité je stabilní zajištění přípravku na otočném stole a to i v případě jeho naklápění. Připevnění by mělo být rychlé a umožňovat založení konstrukce z více pozic otočení pro snadné oskenování dílů ze všech stran. Hroty a hřídele jsou průchozí součásti v přípravku, a proto musí stojan dosedat na boční strany ramene konstrukce, kde nejsou prvky bránící v jeho upevnění.

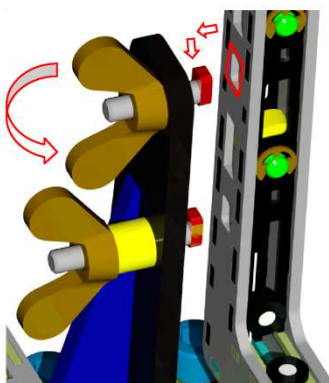
Na otočném stole jsou pouze závitové otvory a není možné přesně zajistit stojan ke stolu pomocí kolíků. Nepřesnosti ustavení by mohly vést k vyvození působení sil na přípravek a mohlo by dojít ke zkreslení výsledků vlivem prohnutí ramen. Z toho důvodu je stojan navrhován jako jeden celek, který zajistí vždy stejnou vzdálenost roztečí podpěr.

Pro upevnění přípravku byly navrženy dvě varianty, které by bylo možné použít. Obě metody vycházely z podmínky, že stojan nesmí bránit hřídelím ani hrotům v konstrukci.

#### 3.10.1 Nasazení a utáhnutí - varianta č. 1

Stojan by byl sestaven z plechů vypálených pomocí laseru. Přípravek by byl nejdříve nasazen uzpůsobenými otvory na čepy ve stojanu a následně dotažen pomocí křídlových matic. Mechanismus by umožnil snadné a rychlé upnutí konstrukce. Díky upraveným hlavám šroubů by byl přípravek zajištěn proti uvolnění i během naklápění a otáčení stolu.

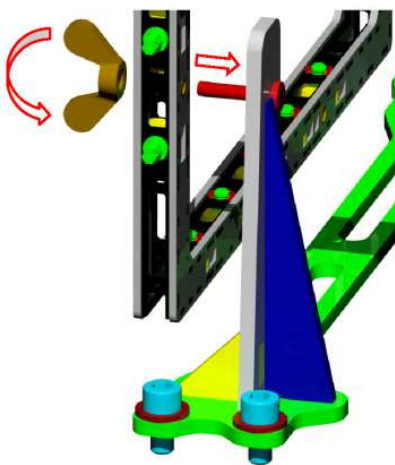
Na obrázku 34 je červeným obrazcem vyznačen průchozí otvor v přípravku, kterým konstrukce zapadne na vyosenou obdélníkovou hlavu šroubu. Konstrukce se nejdříve upevní na čepy a následně utáhne křídlovou maticí. Červenými šipkami je znázorněn postup upevnění přípravku do stojanu. Stojan dosedá na jednu stranu ramene přípravku, kde při upevnění nebudou vidět referenční body.



Obr. 34 Upevnění přípravku 1

### 3.10.2 Upevnění na čepy - varianta č. 2

V přípravku by byly vytvořeny průchozí otvory pro čepy upevněné ve stojanu. Konstrukce by se po nasazení dotáhla pomocí křídlových matic. Princip upínání je znázorněný na obrázku 35 červenými šipkami. Stojan je obdobný jako u předešlé konstrukce, kde opět nejsou vidět referenční body na jedné straně ramene přípravku.

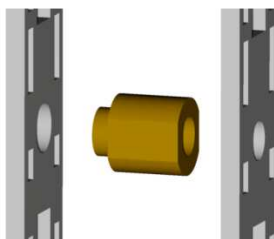


Obr. 35 Upevnění přípravku 2

Byla zvolena varianta stojanu č. 1 označena jako „Upevnění na čepy“, která je finančně méně náročná, a proces upnutí je rychlejší.

Vybraný koncept byl dále podrobněji zpracován. Muselo se brát v potaz, že by během upínání mohlo dojít k deformaci ramene přípravku s referenčními body. To by vnášelo chyby do měření. Z důvodu zamezení průhybu plechů byl přípravek vyztužen vzpěrou, která zabrání deformaci konstrukce při upnutí. Upínací síla se bude přenášet

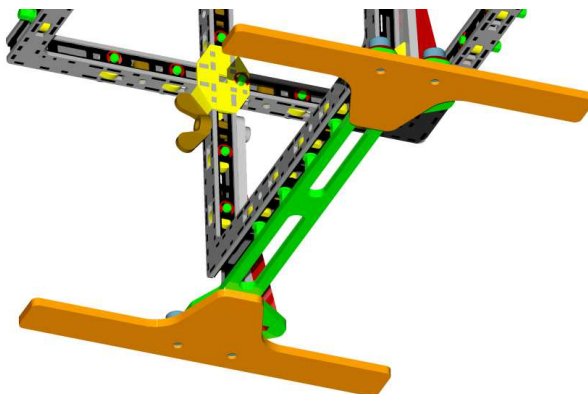
pomocí uvedeného prvku (obrázek 36). Stojan byl sestaven z vypálených plechů o tloušťce 4 mm.



Obr. 36 Rozpěrný prvek

### 3.10.3 Použití stojanu mimo otočný stůl GOM

Stojan byl navržen především pro upevnění na otočný a naklápěcí stůl. Pro univerzálnější využití konstrukce je na obrázku 37 znázorněna možnost ustavení i mimo něj. Ke stojanu se připevní pomocné stabilizační prvky, které umožní jeho ustavení na rovinný povrch.



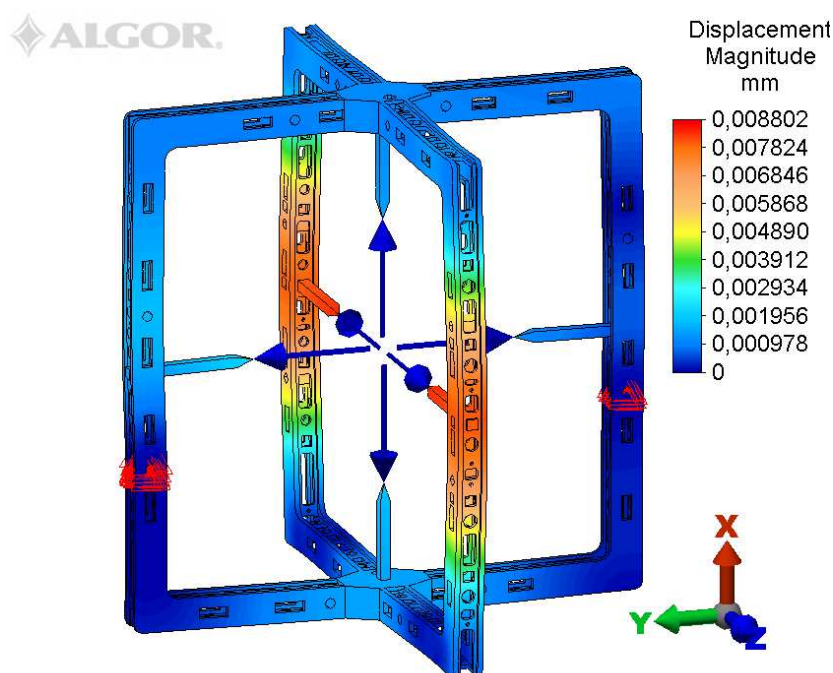
Obr. 37 Pomocné stabilizační prvky

### 3.11 Tuhost přípravku

Důležitou vlastností je tuhost konstrukce. Pokud se bude přípravek minimálně deformovat, získají se kvalitní výsledky. Pomocí programu ALGOR byly zjištěny vlastnosti přípravku a uzpůsobeny tvary výpalků pro větší pevnost celého přípravku.

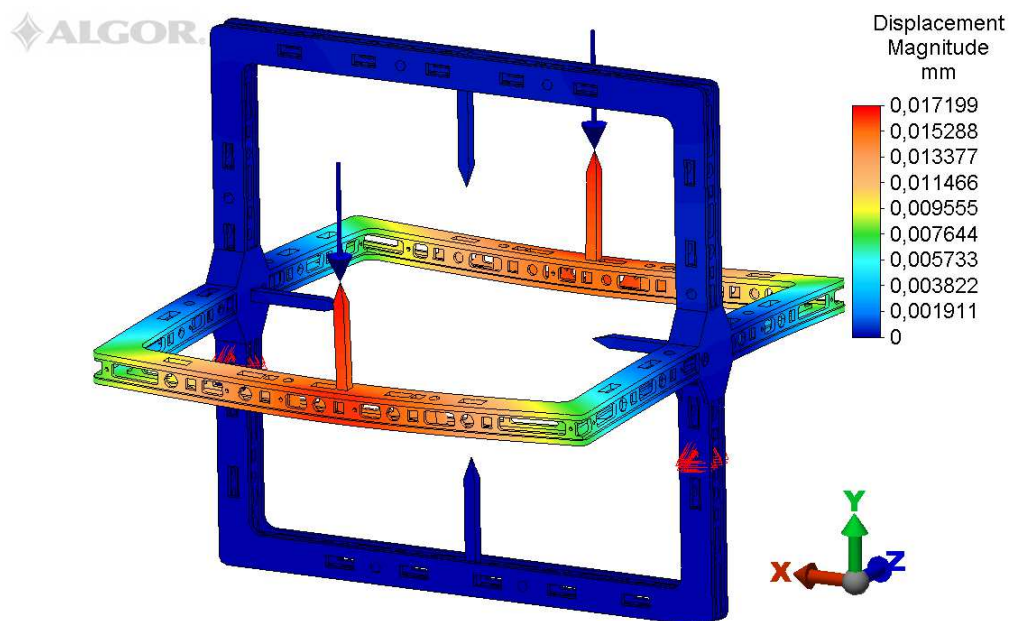
Na obrázku 38 je znázorněná barevná mapa prohnutí ramen přípravku, kde červené trojúhelníky znázorňují upevnění přípravku ve stojanu. Uvažovalo se s působením síly o velikosti 30 N na každý hrot přípravku (modré šipky, které jsou

uprostřed ramen: tzn. šest hrotů). Maximální deformace byla vypočtena pod jednu setinu milimetru, což je dostatečná pevnost pro optický skener ATOS II. V místě spojení ramen dochází k menším deformacím, z toho důvodu je vhodné těžší díly upínat do přípravku v poloze znázorněné na obrázku 38. Tím se zajistí větší přesnost digitalizovaného modelu. Stojan zároveň zvýší tuhost přípravku v místech jeho uložení (dojde k menším deformacím).



Obr. 38 Barevná mapa 1: deformace přípravku

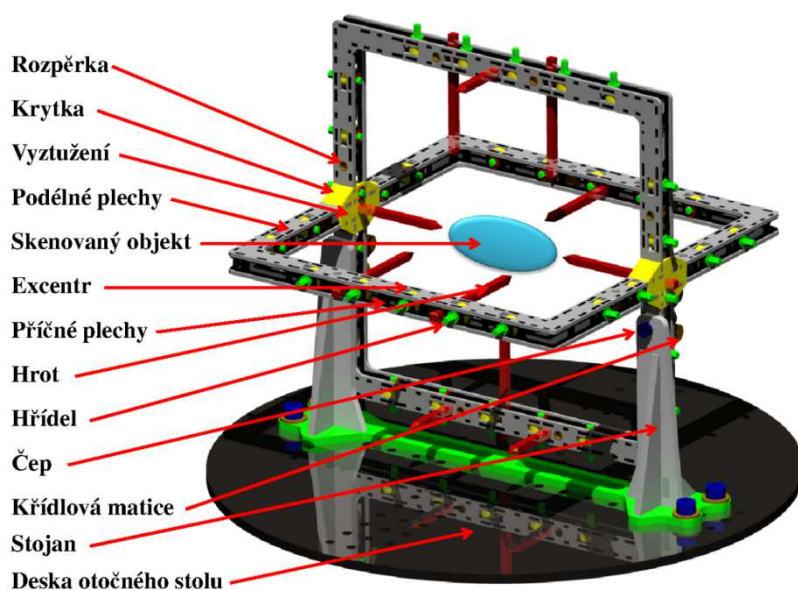
Do dvou ramen přípravku je možné upnout hroty kolmo (viz obrázek 39, strana 52). Pomocí metody konečných prvků byla ověřena deformace přípravku při zatížení ramene silami o velikosti 15 N znázorněné modrými šipkami. Barevná mapa představuje deformaci přípravku. Červené trojúhelníky znázorňují uchycení konstrukce ve stojanu. Při zatížení 15 N (každá síla) vyšla maximální deformace 0,0172 mm. Z důvodu minimalizování chyb je vhodné upínat v takto připravených hrotech objekty o nejvyšší hmotnosti 1 kg.



Obr. 39 Barevná mapa 2: deformace přípravku

### 3.12 Zkonstruovaný přípravek

Na obrázku 40 je znázorněno schéma přípravku a prvků, ze kterých byla konstrukce sestavena. Ta je upevněna pomocí stojanu k otočnému stolu (zobrazena černou barvou). Světle modrá elipsa představuje objekt zajištěný pomocí hrotů, který se bude nacházet uvnitř přípravku.

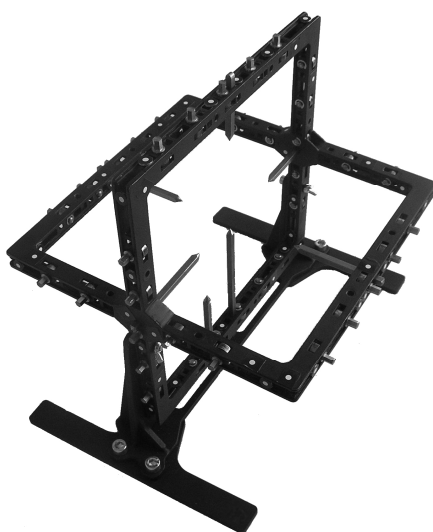


Obr. 40 Schéma přípravku

Vypálené plechy byly sestaveny a poté připájeny pomocí tvrdého pájení. Pro větší pevnost bylo použito lepidlo na kov ERGO pro spojování kovů. Nerovnosti povrchu přípravku byly zarovnány tmelem polyester, kterým se zakryly propadliny v ramenech. Na obrázku 41 je vidět fotografie hotového přípravku připevněného ve stojanu s několika upnutými hroty. Vnější rozměry konstrukce vycházely z velikosti skenovacího prostoru skeneru ATOS II s objektivem 250.

Přípravek je sestaven z tuhého rámu, ve kterém jsou vloženy excentry nasazené na hřídelích. Při působení malých vstupních sil výstředníkový mechanismus vyvine poměrně velké síly na hroty a zajistí jejich stabilní pozici. Systém upínání je navíc rozebíratelný a v případě poruchy či potřeby ho lze vyjmout a vyměnit za jiný. V místě spojení ramen se nacházejí vyztužující prvky pro zajištění pevnosti přípravku. Konstrukce se k otočnému stolu připevňuje pomocí stojanu, ve kterém je možné přípravek ustavit v různých polohách. Přípravek a stojan byly povrchově upraveny černou barvou, kterou skener nedokáže zaznamenat. Z důvodu zachování možnosti otáčení konstrukce ve stojanu je nutné, aby hroty nepřesahovaly víc jak 15 mm z vnějších plechů. Pokud by hroty byly upnuty s větším přesahem, omezilo by se otáčení konstrukce z důvodu kolize s uvedeným pomocným prvkem. V přípravku je možné upnout až 38 hrotů, z toho důvodu je možné upínat objekty rozmanitých tvarů a povrchů. Vzhledem ke specificky navrženým upínacím hrotům i v kolmém směru k rámu je u lehčích dílů umožněno upnutí i větších modelů.

Do přípravku lze upnout díly o maximálním průřezu 175 x 115 mm a hmotnosti do 3 kg. Hmotnost celé konstrukce včetně stojanu je 1,25 kg.



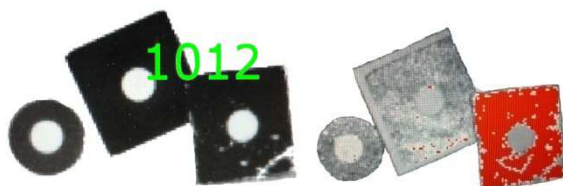
Obr. 41 Vyrobený přípravek se stojanem

### 3.13 Použité referenční body

Pro efektivní využití přípravku byly na konstrukci připevněny body, které musí být odolné vůči otěru a vodě. Na tyto značky se zaměřuje skener ATOS II. Díky nim nebude nutné na skenovaný objekt lepit referenční body.

Na obrázku 42 jsou vidět porovnávané referenční body. Nalevo je značka originálního bodu od firmy MCAE, uprostřed je bod vytisknutý na polyethylenový samolepící materiál laserovou digitální tiskárnou a napravo je bod vytisknutý digitální voskovou tiskárnou na syntetický papír. Značky byly otestovány na skeneru ATOS II a dále byly zjištěny jejich vlastnosti. Na obrázku 42 vpravo je znázorněný červenou barvou odraz bodů (při kolmém pohledu), kdy se nedokáže bod zaznamenat. Nejpresnější je originální bod vlevo, ale nebyl použit z důvodu jeho malé otěruvzdornosti, protože značky budou opakovaně očišťovány od křídového nástřiku. Prostřední bod na obrázku 42 má nejvíce odolný povrch a jeho vlastnosti vyšly pro toto použití jako nejlepší a následně byl zvolen.

Na přípravek by bylo možné také upevnit keramické body od firmy MCAE Systems, které by měly delší životnost, ale z důvodu vyšších nákladů se nepoužily.

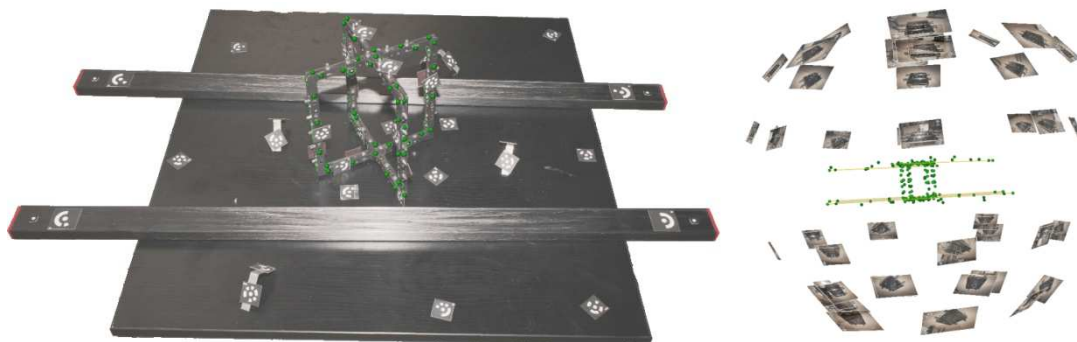


Obr. 42 Porovnávané referenční body

Připevněné referenční body na přípravku byly zaznamenány se spoluprací s firmou MCAE Systems pomocí systému TRITOP (obrázek 43 vlevo), a tak byly získány jejich přesné souřadnice. Při snímání nebylo možné zaznamenat kompletní konstrukci na jedno ustavení a musely se provést dvě série měření. Získané souřadnice z jednotlivých měření bylo nutné vzájemně spojit (obrázek 43 vpravo). Po jejich sjednocení se informace musely zpracovat a upravit v XML editoru. Protože nebylo možné dokonale vzájemně sloučit všechny odpovídající dvojice bodů, využilo se softwaru Microsoft Office Excel s funkcí mapováním XML. Zde bylo možné uvedené body sjednotit a zároveň zachovat výstupní strukturu pro snadné importování do programu GOM Inspect Professional. Bez provedení uvedené operace by v systému



zůstávaly dva blízké body. V tomto případě by software nevěděl, který bod má v daný okamžik použít a získané virtuální modely by se mohly značně lišit od reálných součástí.



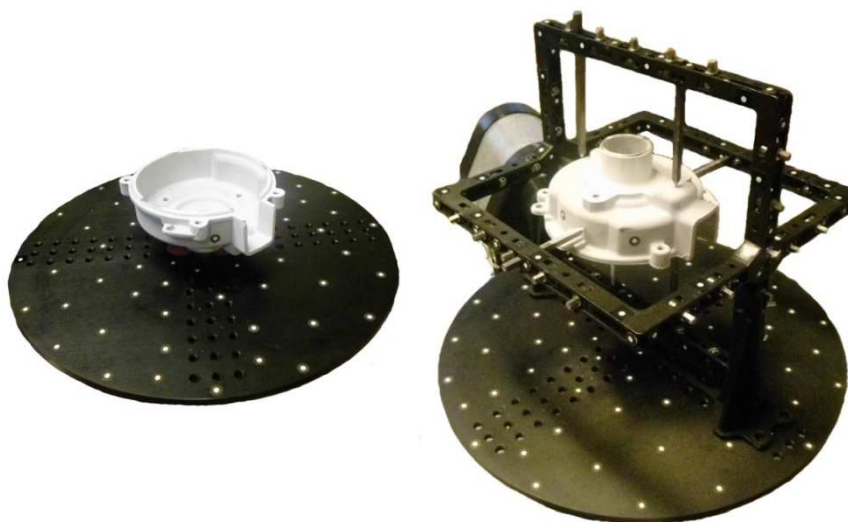
**Obr. 43 Použití systému TRITOP ve firmě MCAE**

Vyrobený přípravek byl také zaznamenán stejným způsobem skenerem ATOS II s objektivem 250, který je v laboratořích katedry Výrobních systémů. Zde nebylo nutné provádět dvě série měření. Přípravek se nejdříve změřil z jedné strany, následně otočil a body, které nemohl skener dříve vidět, byly pomocí společných známých bodů spojeny s určitou transformační chybou. Takto získané údaje byly přesnější než souřadnice bodů změřených pomocí systému TRITOP. To mohlo být zapříčiněno nevhodným rozmístěním kalibračních objektů a jejich velikostmi. Přípravek má vnější rozměry 200 mm. Systém TRITOP se především užívá pro měření rozměrných objektů.



## 4 Rozbor měření objektu s přípravkem a bez přípravku

Vyrobený přípravek byl otestován v praxi na skeneru ATOS II. Pro porovnání byl zvolen odlitek zobrazený na obrázku 44, který má členitý povrch. Nejdříve byla provedena digitalizace součásti bez přípravku (obrázek 44 vlevo) a poté s využitím zkonstruovaného přípravku (obrázek 44 vpravo). Získané informace byly porovnány v softwaru GOM Inspect. U obou procesů digitalizace součásti byl zaznamenán čas od začátku přípravy objektu pro skenování až po finální získanou podobu modelu.



Obr. 44 Odlitek upevněný na stole (vlevo) a v přípravku (vpravo)

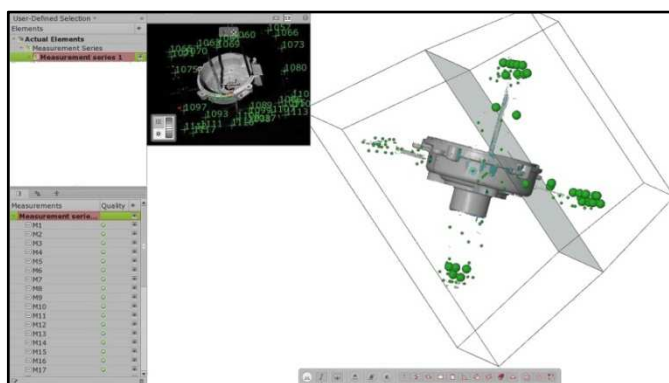
### 4.1 Skenování bez přípravku

Před skenováním bylo nutné na objekt připevnit referenční body. Jelikož povrch součásti byl lesklý, bylo nutné provést úpravu povrchu nanesením křídového postříku. Po uvedené úpravě se body musely znovu očistit, aby je skener dokázal zaznamenat. Pro samotný proces skenování bylo využito otočného stolu, pomocí kterého byla provedena automatická série měření objektu. Po jejím provedení se v programu GOM Inspect založila nová série měření. Objekt byl následně vyjmut a poté na něj byl nanesen křídový nástřík z opačné strany. Dále byly očistěny referenční body a objekt byl opatrně připevněn k desce. Po ustavení odlitku se opět provedla série měření objektu z opačné strany. Získaná data z měření bylo nutné vzájemně sjednotit pomocí minimálně tří společných bodů a provést jejich vzájemnou transformaci.

## 4.2 Skenování s přípravkem

Pro porovnání byl využit stejný objekt, který byl změřen bez přípravku. Odlitek byl nejdříve vložen do konstrukce a pomocí hrotů upevněn. Jelikož se referenční body nacházely na přípravku, nebylo nutné je připevnit na měřený objekt. Na upnutou součást v konstrukci se nanasl křídový postřík. Přípravek byl poté částí tkaniny očištěn a vložen do stojanu, který byl připevněný k otočnému stolu a provedl se stejný počet měření. Po provedení série měření se konstrukce vyjmula ze stojanu a upnula se v jiné pozici. Díky známým referenčním bodům se nemusela zakládat nová série měření, ale pokračovalo se v předešlé.

Na obrázku 45 je znázorněno uživatelské prostředí softwaru GOM Inspect Professional, kde v pravé části obrázku je vidět skenovaný objekt upnutý v přípravku. Na něm se nacházejí referenční body vyznačené zelenými značkami, jejichž poloha je systému předem známá. Definovaný měřicí objem je znázorněn černým obrazcem. V obrázku je zřetelný tvar a velikost přípravku nacházejícího se v daném měřeném objemu, pro který byl navržen. Na každém libovolně provedeném snímku skener vždy viděl dostatečný počet diskrétních značek, kterými se jednotlivé snímky vzájemně spojily.

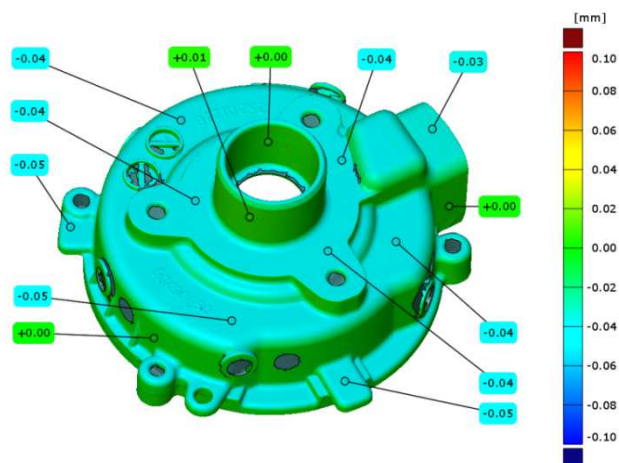


Obr. 45 Software GOM Inspect Professional s měřeným objektem

## 4.3 Porovnání přesnosti

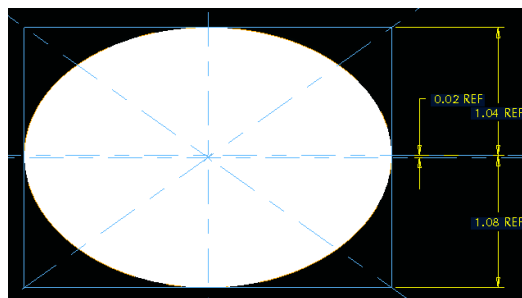
Dalším úkolem práce bylo ověření přesnosti skenování součástí s a bez přípravku. Získané digitální podoby objektu byly vzájemně porovnány pomocí programu GOM Inspect. Ten umožnil jejich rozdíly znázornit pomocí barevné mapy zobrazené na obrázku 46. Jako základní nominální model se vybrala data z měření

Při měření objektu bez přípravku byly referenční body připevněny na válcové ploše, protože se na objektu nenacházely vhodné rovinné plochy pro jejich umístění. Pomocí uvedených bodů se spojily dvě série měření (z jedné a z opačné strany skenované pod úhlem  $45^\circ$ ). Při prvním porovnání naskenovaného odlitku s použitím přípravku a bez něj byly zjištěny odchylky v rovinných plochách (až 0,04 mm), ale tvarové plochy (válce, svislé stěny) byly téměř totožné. To mohlo být způsobeno prohnutím ramene přípravku, nedostatečným upevněním objektu, nebo nepřesným zaznamenáním bodů na válcové ploše. Z těchto důvodů byla provedena analýza, kdy se na stejný objekt připevnil podložky, na které se nalepily referenční body. Ty se zároveň umístily i na válcové plochy. Následně byla provedena série měření pod úhlem  $45^\circ$  z obou stran. Získaná data byla nejdříve spojena pomocí bodů připevněných na válcové ploše a poté referenčními body z rovinných prvků. Tato data byla vzájemně porovnána pomocí barevné mapy, která je znázorněná na obrázku 46. Získané virtuální modely byly přesně vzájemně ustaveny na dolní plochu, kde vznikají nulové odchylky. Díky tomuto ustavení je vidět celkový rozdíl dvou modelů spojených pomocí bodů na rovinné ploše a z válcových ploch. Odchylky obou modelů se pohybovaly v rozmezí 0,04 mm.



Pomocí získaných informací je vidět, že chyba vznikla špatným zaznamenáním bodů připevněných na válcové ploše. Systém GOM Inspect Professional

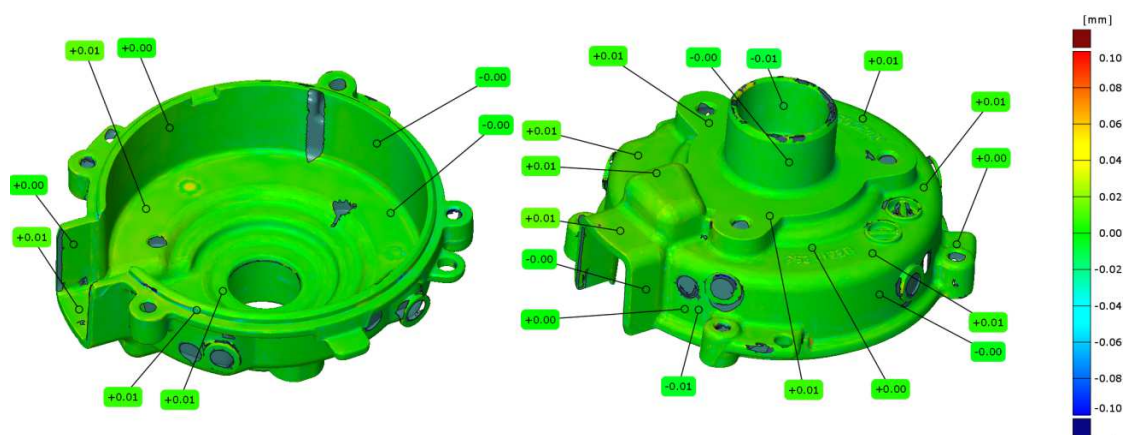
pod libovolným úhlem vidí referenční bod ve tvaru pravidelné elipsy a je schopen najít přesný střed uvedené značky. Z toho důvodu byl vytvořen rozbor, kdy byl vymodelován válec o průměru 100 mm, na kterém se nacházel referenční bod. Součást byla natočena pod úhlem 45° a zjišťoval se tvar elipsy, která je zobrazena na obrázku 47. Z uvedeného obrázku je vidět, že střed bodu se posunul pro uvedené rozměry válce o 0,02 mm. Získané informace korespondují s porovnáním na obrázku 46.



Obr. 47 Analýza posunu středu bodu

Díky měření objektu upnutého v přípravku bylo zjištěno, že není vhodné lepit referenční body na válcové plochy, přestože v manuálu zařízení skeneru je uvedeno, že se můžou lepit i na mírně zakřivené plochy.

Získané série měření modelu bez přípravku byly tedy spojeny pomocí referenčních bodů na rovinné ploše. Následně bylo provedeno vzájemné porovnání modelů měřených s použitím a bez použití přípravku. Na obrázku 48 je vidět porovnání jednotlivých získaných modelů pomocí barevné mapy. Konkrétní místa byla vynesena pomocí odkazových čar, kde je zobrazena velikost odchylky jednotlivých modelů. Chyba skeneru je v toleranci dvou setin milimetru. Rozdíl obou dílů se pohyboval v rozmezí uvedené nepřesnosti, tudíž navrhnutý přípravek vyhovuje.



Obr. 48 Barevná mapa přesnosti skenování

#### 4.4 Porovnání času

Při měření objektu byly zároveň zaznamenány časy jednotlivých operací (tabulka 8). Velkým přínosem přípravku bylo ušetření času přípravy objektu před samotným skenováním, protože odpadlo lepení bodů a jejich náročné čištění.

Tab. 8 Časy operací při digitalizaci objektu

Měření času			
Bez přípravku		S přípravkem	
Operace	Čas [min]	Operace	Čas [min]
Očištění od mastnot a nečistot	5,0	Očištění od mastnot a nečistot	5,0
Lepení referenčních bodů	3,0	Upnutí objektu v přípravku	5,0
Nanesení křídové vrstvy (1. strana)	3,0	Nanesení křídové vrstvy	5,0
Čištění referenčních bodů	3,0	Očištění bodů na přípravku	5,0
Upevnění objektu	1,0	Skenování objektu	4,0
Skenování objektu	4,0	Otočení konstrukce	0,5
Úprava dat v systému	4,0	Skenování objektu	4,0
Nanesení křídové vrstvy (2. strana)	3,0	Úprava dat v systému	3,0
Čištění referenčních bodů	2,0		
Upevnění objektu	1,0		
Skenování objektu	4,0		
Úprava dat v systému	4,0		
Čas celkem	37,0	Čas celkem	31,5

Časy trvání jednotlivých operací byly zaznamenány pro vybraný objekt. Pro odlišné součásti se časy mohou lišit dle složitosti modelu. Výsledný čas skenování s přípravkem vyšel o 5,5 minuty lépe než bez přípravku. To je především ušetřený čas, kdy není nutné dvakrát nanášet křídovou vrstvu na objekt z jedné a z druhé strany. Také zároveň odpadl značný počet operací, které jsou nutné k zaznamenání modelu. Celý proces skenování byl snadnější, protože se po ukončení série měření nemusela zakládat nová série a stačilo přípravek ve stojanu pouze otočit a potvrdit další měření.

#### 4.5 Ekonomické zhodnocení

Rám přípravku se skládá z plechů, které byly vypáleny na laseru TRUMATIC L3030. Z důvodu levnější výroby byly na tomto typu laseru také vyrobeny použité excentry, v kterých je čtvercový otvor. Rotační díly hřídele, referenční výstupky a rozpěrky byly zhotoveny na soustruhu CNC MASTURN 32 a pro finální úpravy hřídelí byla použita frézka CNC SPEED 1270. V tabulce 9 jsou uvedeny výsledné ceny vyrobených součástí.

**Tab. 9 Ekonomické zhodnocení - vyráběné díly**

Vyráběné díly					
	STROJ	Čas na zhotovení	Sazba stroje [Kč/hod]	Cena výroby [Kč]	Náklady materiál [Kč]
Výstupky pro ref. body	Soustruh	2,0 [hod]	600	1200	45
Rozpěrky		1,0 [hod]		600	15
Hřídele		4,0 [hod]		2400	80
Hroty		2,0 [hod]		1200	558
Čepy		0,3 [hod]		180	5
Dokončení hřídelí	Frézka	3,0 [hod]	600	1800	---
Plech 4 mm 11 523	Laser	1,25 [min]	1200	25	45
Plech 2 mm 11 523		3,50 [min]		70	102
Plech 1,5 mm 11 523		8,71 [min]		175	33
Plech 4 mm 12 050		5,57 [min]		112	45
Suma celkem					8690

Pro úplné zhotovení funkčního přípravku musely být koupeny normalizované součásti a pomocné prvky. Finanční náklady jsou znázorněny v tabulce 10. Jako utahovací prvek byl koupen T klíč.

**Tab. 10 Ekonomické zhodnocení - nakupované díly**

<b>Nakupované díly</b>				
Součást	Označení	Počet kusů	Cena [Kč/ks]	Cena celkem [Kč]
Třmenový kroužek	DIN 6799	38	0,33	13
Šroub M6 - 8	DIN 912	4	1,00	4
Šroub M6 - 12	DIN 912	4	1,25	5
Matice křídlová	DIN 315	2	4,20	9
T klíč s redukcí	---	1	109,00	109
Povrchová úprava	---	---	169,00	169
Referenční body	---	1	40,00	40
<b>Suma celkem</b>				<b>349</b>

Celková cena funkčního přípravku byla 9049 Kč. Tuto cenu by bylo možné snížit zvolením jiné metody výroby výstupků pro referenční body (například vypálením výstupků na laseru). Při čištění přípravku od křídlové vrstvy se bude působit silami na uvedené prvky, tím by mohlo dojít k jejich posunutí a uvolnění. Proto byly zvoleny výstupky s osazením (vyrobené soustružením) vsazené do připravených otvorů v plechu. Tím byla zajištěna pevná a stabilní pozice referenčních bodů.

## 5 Vyhodnocení výsledků, závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a vyrobit přípravek pro zefektivnění 3D optického skenování. Záměr práce byl dosažen. Zhotovený přípravek je lehký a zajišťuje vysokou tuhost, přesnost měření, minimální stínění, rychlé a pevné upínání objektu. Zmíněný přípravek byl ověřen v praxi.

Jednou z výhod je, že při měření kompletního povrchu objektu lze přípravek s upnutým objektem snadno vyjmout ze stojanu a upnout v jiné pozici.

Díky sestavenému rámu složeného z vypálených plechů na laseru se snížily celkové náklady na jeho výrobu a hmotnost konstrukce. Objekt uvnitř konstrukce se upíná pomocí hrotů, které jsou zajištěny výstředníkovými mechanismy. Ty zajišťují rychlé a pevné upnutí hrotů při vynaložení minimálních sil. Z důvodu univerzálnosti upínaného objektu, se v přípravku nachází větší počet upevňujících mechanismů vhodně rozmístěných v ramenou konstrukce.

Přípravek je primárně určen pro optický 3D skener ATOS II s měřicím objemem 250 x 200 x 200 mm. Jeho vnější velikost byla proto navržena na jeho skenovaný objem. Konstrukce je doplněna stojanem, který umožňuje jeho upnutí na otočném stole, ale i mimo něj na rovinný povrch.

Na přípravku byly připevněny referenční body a zaznamenány jejich přesné souřadnice. Díky nim se systém dokáže orientovat v prostoru přípravku. Konstrukce se bude často čistit tkaninou od antireflexní vrstvy a mohlo by dojít časem k znehodnocení diskretních značek. Z toho důvodu by bylo vhodné konstrukci doplnit krytkou, která by zabránila jejich poničení.

Další výhodou je, že se nemusí lepit referenční body na měřené objekty. Velkým přínosem přípravku je ušetření celkového času při zdigitalizování objektu. Na součásti není nutné provádět nástřik antireflexní vrstvy postupně z obou stran, ale stačí nanést vrstvu jen jednou ze všech stran. Přípravek by mohl pomoci i při skenování objektů, které by bylo jinak nemožné zdigitalizovat nebo jen velice obtížně, usnadnit a zpříjemnit práci uživateli skeneru.

## Seznam použité literatury:

- [1] NAVRÁTIL, Robert. Principy digitalizace. *ROBO.HYPERLINK* [online]. 2000 [cit. 2012-12-27]. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/>>.
- [2] DIGITALIZACE - JEJÍ PRINCIPY A ROZDĚLENÍ. *MMspektrum* [online]. 2004, č. 040618 [cit. 2013-01-6]. Dostupné z: <[mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html%20http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main03.html](http://mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html%20http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main03.html)>.
- [3] SYSTÉM ATOS VÝUKOVÝ MODUL In: *Dokumenty.uk.fme.vutbr* [online]. [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <<http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/FRVS/atos.pdf>>.
- [4] ATOS TRIPLE SCAN. *MCAE 3D Digitální technologie* [online]. 2013 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <<http://www.mcae.cz/atos>>.
- [5] NAVRÁTIL, Robert. Optické 3D skenery. *ROBO.HYPERLINK* [online]. 2000 [cit. 2013-12-27]. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/>>.
- [6] Přednášky předmětu 3D digitalizace a rapid prototyping 1, 3D digitalizace a rapid prototyping 2.
- [7] SOUČEK, Tomáš. Příprava vstupních geometrických dat pro MKP softwary. *E-learning* [online]. 2010 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <[http://blade1.ft.tul.cz/~tyr/cgi-bin/elearning/elearning.fcgi?page=publ&action=showThemeContent&theme\\_id=36](http://blade1.ft.tul.cz/~tyr/cgi-bin/elearning/elearning.fcgi?page=publ&action=showThemeContent&theme_id=36)>.
- [8] GEOMAGIC STUDIO. *3D-skenovani.cz* [online]. 2013 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <<http://www.3d-skenovani.cz/geomagic-studio>>.
- [9] SOFTWARE. *MCAE 3D Digitální technologie* [online]. 2013 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <<http://www.mcae.cz/inspection>>.
- [10] ANLEITUNG GOM ATOS I. *EBOOKBROWSE* [online]. 2010 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <<http://ebookbrowse.com/anleitung-gom-atos-i-pdf-d446424482>>.



- [11] SLANINA, Jan. RhinoPhoto - 3D digitalizace pomocí fotoaparátu. *Rhino3D* [online]. 2010 [cit. 2013-02-21]. Dostupné z: <<http://www.rhino3d.cz/clanky/zasuvne-moduly/rhinophoto-3d-digitalizace-pomoci-fotoaparatu.html>>.
- [12] TRITOP. *MCAE 3D Digitální technologie* [online]. 2013 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <<http://www.mcae.cz/tritop>>.
- [13] SOUČEK, Tomáš. 3D Scanning & Manufacturing. *Denfordata* [online]. 2012 [cit. 2012-24-24]. Dostupné z: <<http://www.denfordata.com/pdfs/product-literature/scanning-package.pdf>>.
- [14] GOM MBH. *Application Information* 2011, 2 s. [cit. 2013-23-03].
- [15] ATOS SCANBOX IN USE - WATCH A COMPLETE WORKFLOW. *GOM Optical Measurement Techniques* [online]. 2012 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <<http://www.gom.com/news/history/single/article/atos-scanbox-in-use-watch-a-complete-workflow.html>>.
- [16] CAPTURE3D: 3D INDUSTRIAL MEASUREMENT SOLUTIONS. *CAPTURED 3D* [online]. 2007 [cit. 2013-01-16]. Dostupné z: <<http://www.capture3d.com/>>.
- [17] VÁVRA, Pavel. *STROJÍRENSKÉ TABULKY*. 5. vyd. ÚVALY: ALBRA, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [18] AUGISTIN Frank A KOLEKTIV. *STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE 4 : VÝROBNÍ POMŮCKY*. 1978. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1978. 352 s. 04-224-78.
- [19] DUŠÁK, Karel. *OBRÁBĚCÍ PŘÍPRAVKY*. Říjen 2007. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. 185 s. ISBN 80-7183-284-7.
- [20] HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. *PŘÍRUČKA STROJNÍHO INŽENÝRA: Obecné strojní části 1*. Brno: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3.

## Seznam příloh:

Příloha I:	Analýza stínění varianta č.1	
Příloha II:	Analýza stínění varianta č.2	
Příloha III:	Analýza stínění varianta č.3	
Příloha IV:	SESTAVA_PRIPRAVEK	- označení na výkrese: A3-KVS-VS-236-01-01
Příloha V:	SESTAVA_RAM	- označení na výkrese: A2-KVS-VS-236-01-02
Příloha VI:	SESTAVA_STOJAN	- označení na výkrese: A3-KVS-VS-236-01-03
Příloha VII:	SESTAVA_VYSTREDNIK_1	- označení na výkrese: A4-KVS-VS-236-01-04
Příloha VIII:	SESTAVA_VYSTREDNIK_2	- označení na výkrese: A4-KVS-VS-236-01-05
Příloha IX:	CEP	- označení na výkrese: A4-KVS-VS-236-03-06
Příloha X:	HRIDEL_1	- označení na výkrese: A4-KVS-VS-236-04-07
Příloha XI:	HRIDEL_2	- označení na výkrese: A4-KVS-VS-236-05-08
Příloha XII:	ROZPERKA	- označení na výkrese: A4-KVS-VS-236-02-09
Příloha XIII:	VYSTUPEK	- označení na výkrese: A4-KVS-VS-236-02-10
Příloha XIV:	VYPALOVACI_SABLONA_1	- označení na výkrese: A3-KVS-VS-236-02-11
Příloha XV:	VYPALOVACI_SABLONA_2	- označení na výkrese: A3-KVS-VS-236-02-12
Příloha XVI:	VYPALOVACI_SABLONA_3	- označení na výkrese: A3-KVS-VS-236-03-13